

Technická univerzita v Liberci
FAKULTA PEDAGOGICKÁ

Katedra: fyziky

Studijní program: učitelství pro základní školy, učitelství pro střední školy

Kombinace: fyzika – informatika

URČOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ BĚŽNÝCH MATERIÁLŮ ULTRAZVUKEM

MECHANICAL PROPERTIES DETERMINATION OF TYPICAL MATERIALS BY ULTRASOUND IMPULSE METHOD

Diplomová práce: 08–FP–KFY–065

Autor:

Jan Šíkl

Podpis:

Adresa:

Palackého 36

466 04, Jablonec nad Nisou

Vedoucí práce: RNDr. Petr Hána, CSc.

Konzultant: Mgr. Stanislav Panoš, PhD.

Počet:

Stran	Slov	Obrázků	Tabulek	Pramenů	Příloh
59	6978	43	10	16	0

V Liberci dne: 13. 5. 2008

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mojí diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 13. 5. 2008

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem své diplomové práce bych chtěl poděkovat RNDr. Petru Hánovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady, čas věnovaný mé práci a za pomoc při realizaci experimentálních prací na ultrazvukové aparatuře.

Dále děkuji Mgr. Milanu Čmelíkovi za cenné informace o chybách měření. Děkuji též studentu doktorandského studia Volodimiru Rhyzenkovi za pomoc a rady potřebné k měření jednotlivých typů vzorků na ultrazvukové aparatuře.

Děkuji také všem ostatním za vstřícnost a pochopení při měření a vypracování diplomové práce.

ANOTACE

Práce se zabývá využitím ultrazvukové metody studia mechanických vlastností pevných látek jako jsou například kovy a skla. Měření se realizovala pomocí přesné ultrazvukové impulsní aparatury pro laboratorní měření. Při měření se používaly ultrazvukové sondy pro podélné a příčné vlny se základní frekvencí 10 – 20 MHz, které umožňují, jak měření relativně tenkých vzorků uvedených materiálů s tloušťkou od 0,5 mm, tak i silných vzorků s tloušťkou 30 mm.

U vybraných vzorků studovaných pevných látek se přesnou hydrostatickou metodou určila jejich hustota. Realizovala se měření doby průletu pro podélné a příčné ultrazvukové vlny. Z naměřených hodnot jsme určili základní mechanické konstanty (Youngův modul, stříhový modul, Poissonova konstanta, Laméovy konstanty) měřených systémů při pokojové teplotě. Výsledky měření jsou statisticky zpracovány. Součástí práce je úvaha o použití ultrazvuku v průmyslu a při výuce fyziky na školách všech stupňů.

Diplomová práce byla vypracována na základě studia odborné literatury. Prezentuje výsledky měření mechanických vlastností běžných izotropních materiálů (kovy a skla) ultrazvukovou metodou.

ANNOTATION

The diploma thesis focuses on the usage ultrasonic method studies of mechanical properties of solids (ex. metals and glasses). All measurings were realized with the use of accurate ultrasonic pulsed laboratory device. During ultrasonic measurements were used ultrasonic probes working with fundamental frequency 10 - 20 MHz for longitudinal and traversal waves. The probes enabled measurement of materials with thicknesses from 0,5 mm to 30 mm.

Densities of samples were classified by exact hydrostatic method. Measurements of time of flight were performed for longitudinal and shear ultrasonic waves. The fundamental mechanical constants (Young's modulus, Shear modulus, Poisson's constant, Lamé coefficients) from measured values were determined at room temperature. Results of measurenets were statistically processed. A part of the thesis is a reflection about the usage of ultrasound in industry and physics tuition at school on all levels.

The diploma thesis was elaborated on basis of study of professional literature. The results of mechanicaall properties measurements common izotropical solids using ultrasonic method are presented.

EINLEITUNG

Die Nutzung von Ultraschall ermöglicht einfach, schnell und nicht destruktiv mechanische Eigenschaften fester Stoffe wie Metall, Glas, Keramik, Kunststoff usw. zu messen. Die Messung der Geschwindigkeit des Ultraschalls bezieht sich zu den elastischen Eigenschaften der Stoffe, die zur Charakteristik von Eigenschaften isotroper Stoffe, als auch anisotroper Stoffe (Kristalle oder z.b. polarisierte piezoelektrische Keramik) genutzt werden können. Die Dämmung der Ultraschallwelle hängt mit der Mikrostruktur der festen Stoffe zusammen.

In der Diplomarbeit nutzen wir die Ultraschall-Impuls-Apparatur der Firma Matec, Modell 7700 für die Ultraschallmessungen im Labor. Die Ultraschallsonden mit einer Grundfrequenz von 10-20 MHz ermöglichen Messungen von relativ dünnen Mustern mit einer Dicke von 0,5 mm bis zu dickeren Mustern mit einer Dicke (Länge) bis 30 mm verschiedener fester Stoffe (Metalle, Glas, Keramik, Kunststoff, usw.).

Bestandteil der Arbeit ist auch die Auswahl geeigneter Test-Muster und die Realisierung der Messung mit Kontakt. Die durchgeführten Messungen werden mit einem geeigneten mathematischen und graphischen Programm (Excel, Origin) verarbeitet. Aus den gemessenen Daten wurden mechanische Grundeigenschaften (Young-Modul und Poisson-Konstante oder Lamé-Konstante) der gemessenen Systeme bestimmt. Die Messergebnisse werden statistisch bearbeitet.

Im Abschluss der Arbeit äußern wir Gedanken über die Nutzung des Ultraschalls bei der Ausbildung auf Schulen aller Stufen.

OBSAH

<u>1. ÚVOD</u>	13
<u>2. STUDIUM ULTRAZVUKU A JEHO VLASTNOSTI</u>	14
2.1. Historie studia šíření zvuku.....	14
2.2. Buzení, vlastnosti a použití ultrazvuku.....	14
2.3. Rozdělení akustiky.....	16
2.4. Veličiny charakterizující ultrazvukovou vlnu.....	16
2.4.1. Rychlost šíření ultrazvuku.....	16
2.4.2. Absorpce ultrazvuku.....	17
2.4.3. Odraz a lom ultrazvuku.....	18
2.5. Druhy ultrazvukových vln.....	18
2.5.1. Podélné vlny (longitudinální).....	18
2.5.2. Příčné vlny (transverzální).....	18
2.5.3. Rychlost šíření mechanických vln v různých hmotných prostředích.....	19
<u>3. TEORETICKÁ ČÁST</u>	20
3.1. Fyzikální popis elastických vlastností pevných těles.....	20
3.1.1. Akustická vlna v anisotropním prostředí.....	20
3.1.2. Měření elastických vlastností pevných homogenních izotropních látek.....	21
3.2. Základní pojmy a vztahy pro izotropní prostředí.....	21
<u>4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</u>	24
4.1. Popis aparatury.....	24
4.1.1. Popis použitých ultrazvukových měničů a vlastní aparatury.....	25
4.1.2. Rychlost zvuku.....	25
4.1.3. Modifikace měření odezvy.....	25
4.1.4. Výsledky měření časové odezvy.....	26
4.2. Vzorky.....	27
4.2.1. Rozměry, typy a vzhled vzorků.....	27
4.2.2. Hustota vzorků.....	28

4.2.3. Naměřené odezvy odražených ultrazvukových vln.....	30
4.2.3.1. Vysokofrekvenční násobná odezva budícího pulsu pro podélné vlnění.....	31
4.2.3.2. Vysokofrekvenční násobná odezva budícího pulsu pro příčné vlnění.....	41
<u>5. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT A URČENÍ CHYB MĚŘENÍ.....</u>	49
5.1. Výpočet rychlosti šíření ultrazvukových vln a její chyba.....	49
5.2. Výpočet elastických modulů a jejich chyb.....	49
<u>6. DISKUSE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....</u>	52
6.1. Tabulkové hodnoty měřených parametrů studovaných materiálů.....	52
6.2. Obecné vlastnosti studovaných materiálů.....	53
6.2.1. Oceli.....	53
6.2.2. Skla.....	54
6.2.3. Titan.....	54
<u>7. ZÁVĚR.....</u>	55
7.1. Měření mechanických vlastností technických materiálů ve strojírenské praxi.....	55
7.2. Zhodnocení použité ultrazvukové metody pro měření mechanických vlastností technických materiálů.....	56
7.3. Využití ultrazvuku při výuce na ZŠ a SŠ.....	56
7.4. Zhodnocení vytyčených cílů práce.....	57
<u>8. SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</u>	59

Přehled použitých symbolů:

m	hmotnost
η	lineární hustota řetězce hmotných bodů
δ	vzdálenost hmotných bodů
k	tuhost pružiny
l	délka tyče
T	perioda kmitu
λ	vlnová délka
f	frekvence
ω	úhlová rychlost
p	akustický tlak
p_0	běžný tlak v prostředí
Z	akustická impedance prostředí
R	koeficient odrazu (refrakce)
α	koeficient útlumu
\vec{F}	vektor síly
\vec{a}	vektor zrychlení
T_{ij}	tenzor napětí
c_{ijk}	složky tenzoru elastického modulu
u_i	složka vektoru výchylky
V	rychlost šíření ultrazvukové vlny
c, v	fázová rychlost zvuku
ρ	hustota materiálu
t	tloušťka vzorků
$\Delta\tau$	doba průletu
E	Youngův modul
G	Smykový modul
ν	Poissonův poměr
μ, λ	Lamého konstanty
l_k	složka normály k povrchovému elementu ds
ds	povrchový element

f_i	složka objemové síly
\vec{n}	směr šíření ultrazvukové vlny
v_i	vlnová polarizace
Γ	Christoffelův tenzor
$c_{\lambda\mu}$	složky tenzoru elastického modulu ve Voightově notaci

1. Úvod

Využití ultrazvuku přináší možnost, jak snadno, rychle a nedestruktivně proměřovat mechanické vlastností pevných látek, kovů, skel, keramik, plastů atd. Měření rychlosti ultrazvuku se vztahuje k elastickým vlastnostem materiálů, které mohou být využity při charakterizaci jak vlastností izotropních materiálů, tak anizotropních materiálů (krystalů nebo například zpolarizovaných piezoelektrických keramik). Útlum ultrazvukové vlny souvisí se mikrostrukturou pevných látek.

V diplomové práci využíváme ultrazvukové impulsní aparatury firmy Matec model 7700 pro laboratorní ultrazvuková měření. Ultrazvukové sondy se základní frekvencí 10 - 20 MHz umožňují měření relativně tenkých vzorků s tloušťkou od 0,5 mm až po silnější vzorky s tloušťkou (délkou) do 30 mm různých pevných látek (kovů, skel, keramik, plastů atd.).

Součástí práce je výběr vhodných testovacích vzorků a realizace měření s kontaktní vazbou. Provedená měření jsou zpracována vhodným matematickým a grafickým programem (Excel, Origin). Z naměřených dat se určily základní mechanické vlastnosti (Youngův modul a Poissonova konstanta nebo Laméovy konstanty) měřených systémů. Výsledky měření budou statisticky zpracovány.

V závěru práce se zamýšlíme o využití ultrazvuku v průmyslu a při výuce na školách.

2. Studium ultrazvuku a jeho vlastnosti

2.1. Historie studia šíření zvuku

Díky tomu, že zvuk vnímáme smysly, a že je základním prostředkem komunikace, patřila akustika k jedné z nejstudovanějších věd rané historie. V novodobé historii to byl Newton, který první popsal šíření zvuku podle současných představ. Uvažoval jednoduchý lineární řetězec hmotných bodů m , ve vzdálenosti δ , vázaných pružinami s tuhostí k , pro který určil rychlost šíření zvukové vlny

$$v = \sqrt{\frac{k \cdot \delta}{\eta}}, \quad (2.1)$$

kde $\eta = \frac{m}{\delta}$ je lineární hustota řetězce. Položil η rovné hustotě vzduchu a $k\delta$ izotermickému koeficientu objemové stlačitelnosti vzduchu. Užití adiabatického modelu (Laplace) pak vedlo k výtečnému souhlasu s experimentem [2].

2.2. Buzení, vlastnosti a použití ultrazvuku

Ultrazvuk se tedy od obyčejného zvuku liší jen svojí vysokou frekvencí. Jeho poměrně příliš vysoká hodnota je příčinou, že se jako zdroje ultrazvuku obvykle používají speciální přístroje a zařízení. Z čistě mechanických zdrojů ultrazvuku jsou to zejména: speciálně konstruovaná kovová uzavřená píšťala velmi malých rozměrů, tzv. *Galtonova píšťala* a na podobném principu založený *Hartmanův akustický generátor*, ve kterém proud vzduchu unikající z kuželové trubice nadzvukovou rychlostí naráží na válcový rezonátor. Podél proudu vzduchu vznikají periodické tlakové změny, které v rezonátoru vyvolávají vzduchové kmity. Pomocí Hartmanova generátoru lze získat ultrazvuk s frekvencí 130 kHz a při použití vodíku až 500 kHz. Nevýhoda těchto generátorů založených na principu píšťaly spočívá v tom, že ultrazvuk se budí pouze ve vzduchu, a při případném přechodu do kapaliny nebo kondenzované fáze nastává odraz, který snižuje efektivitu přístroje [1].

Při pokusech s ultrazvukem a při jeho praktickém používání se nejčastěji používají zdroje ultrazvuku piezoelektrické nebo magnetostrikční ultrazvukové generátory, kde se elektrické oscilace vysokých frekvencí přímo přeměňují v oscilace mechanické, a které jsou o mnoho lépe ovladatelné než generátory mechanické [1], [5].

Zdroje ultrazvuku, založené na magnetostrikčním jevu, využívají změn délky těles z feromagnetických materiálů (nikl, železo, kobalt) vlivem magnetického pole. Tyč z feromagnetické látky vložená do osy cívky, kterou prochází střídavý proud vysoké frekvence, se bude podélně natahovat a smršťovat právě ve frekvenci elektrického proudu. Největší amplitudy kmitů dosáhneme, pokud frekvence budícího elektrického proudu bude stejná jako frekvence vlastních kmitů tyče (rezonance). Frekvence základního podélního kmitu je dána vlastnostmi tyče [1]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.2)$$

kde l je délka tyče, E modul pružnosti v tahu a ρ hustota materiálu. Pro generování vyšších frekvencí může tyč kmitat v harmonických, které jsou celočíselným násobkem frekvence základního kmitu. Nemožnost použití magnetostrikčních generátorů při vyšších teplotách spočívá v přechodu feromagnetické látky na paramagnetickou při dosažení Curieovy teploty. Další nevýhoda vyplývá ze silného zahřívání tyče z důvodu průchodu vířivých proudů ve vysokofrekvenčním magnetickém poli budící cívky. Tím se silně ovlivňuje i vlastní frekvence tyče a je nutná regulace frekvence budícího elektrického proudu. Zároveň z důvodu zahřívání tyče (vysokých ztrát) při vyšších frekvencích je prakticky využitelný frekvenční rozsah magnetostrikčních generátorů omezen na 10 - 60kHz [1].

V současnosti se nejvíce používají generátory ultrazvuku využívající inverzního piezoelektrického jevu, který pozorujeme u látek, které nemají střed souměrnosti (křemen, turmalín, Seignettova sůl a piezoelektrické keramiky). Přiložením elektrického napětí na plochy tělesa z piezoelektrického materiálu se těleso začne prodlužovat a smršťovat v závislosti na frekvenci elektrického napětí. Frekvence základního kmitu je zde ovlivněna vlastnostmi kmitajícího tělesa jako u magnetostrikčních generátorů viz. vztah (2.2). Pro generování vyšších frekvencí může těleso kmitat v harmonických, které jsou celočíselným násobkem frekvence základního kmitu – opět stejné jako u magnetostrikčních zdrojů.

Výhodou piezoelektrických generátorů (měničů) je schopnost mechanicky kmitat na podstatně vyšších frekvencích, řádově desítky MHz [1].

2.3. Rozdělení akustiky

Podstatou akustických vln všech frekvencí jsou elastické kmity látky, které se šíří rychlostí závislou na mechanických vlastnostech prostředí [3]. Kmity těles se přenášejí v hmotném prostředí, a tak vzniká mechanické vlnění. Z tohoto důvodu vyplývá nemožnost šíření akustických vln v nehmotném prostředí, ve vakuu. Podle hodnoty frekvence (základní veličina popisující akustické vlny) dělíme mechanické vlny na vlny infrazvukové, zvukové a ultrazvukové.

Zvukem rozumíme takové mechanické vlnění, které vyvolá v lidském uchu vjem. Hodnota frekvence se nachází v intervalu od 16 Hz do 20 kHz (obzvláště horní hranice je značně individualizovaná dle konkrétního jedince).

Vlny o nižším kmitočtu než je 20 Hz se nazývají infrazvukové. Šíří se pevnými látkami a vznikají kmitáním těles téže frekvence. Například pracující stroje, nárazy větru na stavby, tělesa kmitající na pružině aj. můžeme považovat za generátory infrazvuku. Zvláštním případem jsou vlny vzniklé otřesy půdy při zemětřesení, které se šíří zemskou kůrou. Nazýváme je vlnami seizmickými.

Pokud frekvence vln nabývá vyšších hodnot než 20 kHz, hovoříme o ultrazvuku. Horní hranice je limitována pouze mechanickými vlastnostmi budícího tělesa a můžeme se těšit jak vysoké frekvence nám přinese budoucí výzkum. V současné době se můžeme setkat s frekvencemi v řádech GHz generovaných tenkovrstvými měniči. Teoretická hranice ultrazvuku je 10^{14} Hz, která odpovídají tepelným kmitům atomů, iontů či molekul [2]. Jako zdroje se používají magnetostrikční a piezoelektrické generátory.

2.4. Veličiny charakterizující ultrazvukovou vlnu

Pokud se ve hmotném prostředí vyskytuje kmitání, šíří se elastickými silami částic. Postupným vlněním čili vlnou rozumíme právě šíření kmitů v prostředí. Obecně se kmity šíří na všechny strany, a dle tvaru zdroje rozlišujeme vlny kulové, válcové a rovinné.

2.4.1. Rychlost šíření ultrazvuku

Je-li c (veličina charakterizující prostředí) rychlost šíření vlnění (zvuku) v prostředí a T doba periody kmitu, dostáváme vztah pro výpočet vlnové délky λ [5]

$$\lambda = c \cdot T, \quad (2.3)$$

která má význam prostorové vzdálenosti mezi body se stejnou fází.

Převrácená hodnota periody kmitu T se nazývá frekvence vlnění (zvuku) f [3]

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.4)$$

Z důvodu šíření kmitů prostředím je hodnota výchylky vlny y funkcí místa x a času t [1], [3], [5]

$$y = A_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.5)$$

kde A_0 je maximální hodnota výchylky (amplituda) a ω úhlová frekvence ($\omega = 2\pi f$).

V prostředí o hustotě ρ pozorujeme akustický tlak p [5]

$$p = p_0 + p' = p_0 + \omega A \rho c \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.6)$$

kde p_0 je běžný tlak v prostředí, kterým neprochází zvuk a p' střídavá složka akustického tlaku způsobená šířením zvuku prostředím. Maximální hodnotu této proměnlivé složky akustického tlaku určíme [5]

$$p'_{\max} = \omega A \rho c. \quad (2.7)$$

Součin hustoty prostředí ρ a rychlosti zvuku c nazýváme akustickou impedancí prostředí Z [5]

$$Z = \rho c. \quad (2.8)$$

2.4.2. Absorpce ultrazvuku

Prochází-li zvuk prostředím je absorbován, přičemž se energie zvuku přeměňuje v teplo. Amplituda A_x se vzdáleností x od zdroje exponenciálně klesá [5]

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (2.9)$$

kde A_0 je amplituda zdroje a α koeficient absorpce závislý na vlastnostech prostředí.

2.4.3. Odraz a lom ultrazvuku

Na rozhraní dvou různých prostředí nastává odraz a lom zvuku, který můžeme popsat známým Snellovým zákonem z geometrické optiky. Pokud dopadá zvuk kolmo na rozhraní dvou prostředí o akustických impedancích Z_1 a Z_2 , část zvukové energie se odrazí zpět. Koeficient odrazu R je dán předpisem [1], [5]

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}. \quad (2.10)$$

Frekvence průchozího zvuku zůstává nezměněna, a z důvodu jiné rychlosti šíření se mění i vlnová délka [1]

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.11)$$

2.5. Druhy ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlny šířící se prostředím mohou být několika druhů, které se vzájemně liší způsobem pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny.

2.5.1. Podélné vlny (longitudinální)

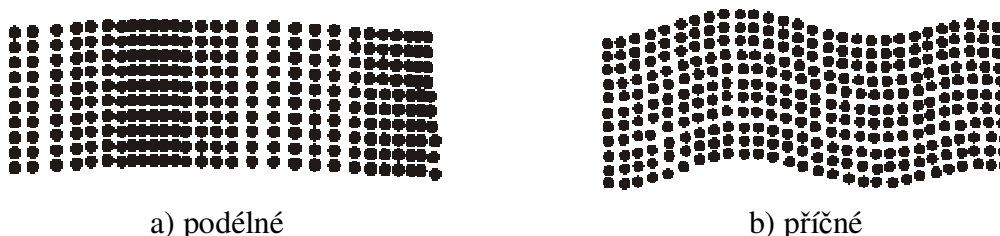
Ultrazvukové vlny u kterých částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlny, viz. obr. 2.1. a), se nazývají podélné. Při tomto typu vlnění dochází ke střídavému zhušťování a zředování částic prostředí, při čemž dochází i ke střídavé změně jeho hustoty. Tyto vlny se mohou šířit každým hmotným prostředím, tuhým, kapalným nebo i plynným. Jedinou podmínkou, aby se v prostředí mohla šířit čistě podélná vlna, jsou jeho dostatečně velké rozměry vzhledem k délce vlny λ [7], [8] a [9].

2.5.2. Příčné vlny (transverzální)

Ultrazvukové vlny u kterých částice prostředí kmitají kolmo na směr šíření vlny, viz. obr. 2.1. b), se nazývají příčné. Šíří se v pevných látkách. V ideálních kapalinách a v plynech tyto vlny nepozorujeme, protože obě tato skupenství nekladou žádný odpor smykovému namáhání. Tuhé látky se liší od kapalin a plynů mnohem vyššími meziatomárními vazebními silami, a proto přenášejí i smykové namáhání. V důsledku toho jsou tyto látky jediné, které mohou přenášet všechny druhy ultrazvukových vln.

Některé druhy látek jako např. krystaly, jsou anizotropické, což způsobuje, že rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na orientaci.

Rychlost šíření příčných vln je vždy menší než vln podélných, a proto při téže frekvenci mají kratší délku vlny než podélné [7], [8] a [9].



Obr.2.1 Podélné a příčné ultrazvukové vlny

2.5.3. Rychlost šíření mechanických vln v různých hmotných prostředích

Zatímco v pevných látkách se mohou šířit všechny druhy vln, v kapalinách a plynech lze zaznamenat pouze vlny podélné. Je to dáno tím, že v kapalinách a plynech jsou částice od sebe více vzdáleny a nemohou přenášet dostatečná smyková zatížení, která jsou třeba ke vzniku příčných vln.

Šíření ultrazvukového vlnění vyvolává v plynném, kapalném nebo tuhém prostředí periodické stlačení a zředování, které je důsledkem střídavých tlakových změn způsobených postupujícím ultrazvukovým vlněním. Rychlost šíření v čistých plynech a kapalinách závisí na tlaku a hustotě prostředí a mění se i s teplotou. Rychlost šíření závisí na tuhosti vazby mezi atomy (molekulami), z toho plyne rychlost šíření ultrazvuku je obvykle nejvyšší v pevných látkách a nejnižší v plynech. Stručně řečeno, tužším prostředím se toto vlnění šíří rychleji [1], [5], [11].

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1. Fyzikální popis elastických vlastností pevných těles

3.1.1. Akustická vlna v anisotropním prostředí

Výpočet šíření rovinné vlny v anisotropním prostředí vychází z řešení pohybové rovnice. Pohybová rovnice pro kontinuum je aplikací druhého Newtonova zákona dynamiky [3].

$$\vec{F} = m \vec{a} . \quad (3.1)$$

Výsledná síla působící na těleso objemu v se rovná součtu sil působících na jeho povrchu. Pro složky této síly můžeme psát

$$F_i = \oint_S T_{ik} l_k ds , \quad (3.2)$$

kde T_{ik} jsou složky tenzoru napětí a l_k jsou složky normály k povrchovému elementu ds .

Podle Greenovy věty převedeme plošný integrál na integrál objemový

$$F_i = \iiint_v \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} dv , \quad (3.3)$$

kde integrand představuje objemovou sílu f_i působící na jednotku objemu.

$$f_i = \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} . \quad (3.4)$$

Pohybová rovnice pro jednotkový objem má pak tvar

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} , \quad (3.5)$$

kde u_i má význam složky vektoru výchylky a pro Hookův zákon ve tvaru $T_{ij} = c_{ijkl} \frac{\partial u_l}{\partial x_j}$

nabývá zobecněný tvar

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} . \quad (3.6)$$

Předpokládáme řešení ve tvaru rovinné vlny

$$u_i = v_i \sin\left(\omega t - \frac{\vec{n} \cdot \vec{x}}{V}\right), \quad (3.7)$$

kde v_i je tzv. vlnová polarizace nezávislá na x_i a t , \vec{n} určuje směr šíření ultrazvukové vlny a V označuje její rychlost.

Po zderivování a dosazení do zobecněné pohybové rovnice obdržíme tzv. *Christoffelovu rovnici*

$$\rho V^2 v_i = c_{ijkl} n_j n_k v_l, \quad (3.8)$$

kde zavádíme tzv. *Christoffelův tenzor* (druhého řádu - matice 3 x 3) [9]

$$\Gamma_{il} = c_{ijkl} n_j n_k. \quad (3.9)$$

Pro daný směr existují obecně tři fázové rychlosti, které jsou řešeními sekulární (charakteristické) rovnice

$$\left| \Gamma_{il} - \rho V^2 \delta_{il} \right| = 0. \quad (3.10)$$

3.1.2. Měření elastických vlastností pevných homogenních izotropních látek

Pružné vlastnosti homogenního izotropního tělesa při malých deformacích plně určují pouze dvě nezávislé materiálové konstanty, za které mohou být zvoleny např. modul pružnosti v tahu (Youngův modul) E a Poissonovo číslo ν , modul pružnosti v tahu E a modul pružnosti ve smyku G nebo Lamého koeficienty μ a λ .

Konstanta E je určena jen vlastnostmi materiálu a nazývá se modul pružnosti v tahu nebo Youngův modul. Poissonovo číslo charakterizuje novou vlastnost materiálu (nezávislou na E). Poissonovo číslo ν je v intervalu $\left\langle 0; \frac{1}{2} \right\rangle$, hodnotu $1/2$ nabývá pro nestlačitelné materiály [7], [9].

3.2. Základní pojmy a vztahy pro izotropní prostředí

Pro měření elastických vlastností jsme předpokládali, že pro izotropní prostředí můžeme zjednodušit matici elastických modulů krychlové soustavy

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix}$$

z důvodu směrové nezávislosti mechanických vlastností do tvaru

$$c = \begin{pmatrix} c_{12}+2c_{44} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12}+2c_{44} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{12}+2c_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix}.$$

Pro nezávislé konstanty zavedeme zvláštní označení, kterého užil Lamé

$$\mu = c_{44}, \lambda = c_{12}. \quad (3.11)$$

Jde-li o homogenní těleso, jsou jeho elastické vlastnosti udány elastickými konstantami λ a μ , které nazýváme Lamého. Matici elastických konstant homogenního izotropního tělesa zapíšeme ve tvaru [7].

$$c_{\text{izotrop.}} = \begin{pmatrix} \lambda+2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}.$$

Christoffelův tenzor v homogenním izotropním prostředí pro směr šíření zvuku $\vec{n} = (0 \ 0 \ 1)$ má tvar

$$\Gamma = \begin{pmatrix} c_{12} + 2c_{44} & c_{12} & 0 \\ 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix}.$$

Řešením sekulární rovnice 3.10 dostaneme implicitní vztahy pro rychlost podélné v_l a příčné v_t vlny

$$c_{12} + 2 \cdot c_{44} = c_{11} = \lambda + 2 \cdot \mu = \rho \cdot v_l^2 \quad (3.12)$$

$$c_{44} = \mu = \rho \cdot v_t^2 . \quad (3.13)$$

Místo λ a μ zavádíme elastické konstanty E a G, kde E nazýváme modulem pružnosti (Youngův modul) a G smykovým modulem. Dále zavádíme Poissonovou konstantou ν .

Youngův modul můžeme vyjádřit jako
$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}, \quad (3.14)$$

kde E představuje podíl tahového napětí a relativního prodloužení vyvolaného tímto napětím.

Smykový modul vyjádříme
$$G = \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (3.15)$$

kde μ je určeno podílem smykového napětí a úhlem smyku vyvolaného tímto napětím. Konstantu μ nazýváme modulem pružnosti ve smyku a značíme ji G.

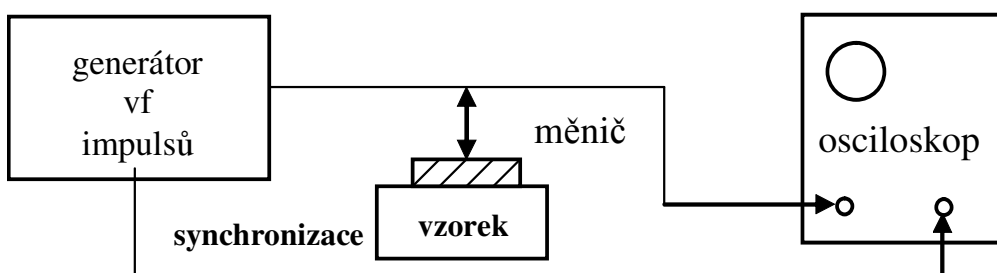
Poissonův poměr
$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}, \quad (3.16)$$

má význam absolutní hodnoty poměru relativního příčného zkrácení k relativnímu podélnému prodloužení [7], [9].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Popis aparatury

V experimentální části se práce zabývá způsobem měření rychlosti ultrazvuku potřebné pro určování mechanických vlastností různých pevných látek ultrazvukovou metodou. Pro měření využíváme impulsní ultrazvukovou aparaturu, jejíž zjednodušené schéma je na obrázku 4.1 [2] a skutečný vzhled na obr. 4.2.



Obr. 4.1 Blokové schéma impulsní aparatury



Obr. 4.2 Vzhled použité aparatury firmy Matec model 7700

4.1.1. Popis použitých ultrazvukových měničů a vlastní aparatury

Pro generování budících ultrazvukových pulsů „tone burst“ (vlnový balík) byl použit pulsní modulátor a přijímač model 7700 se zásuvným modulem typ 755, 0,5 - 22 MHz pro příjem RF (radiofrekvenčních) odezev. Ultrazvukový systém byl postaven z modulů firmy Matec Instruments, Inc. Časová odezva byla zaznamenávána digitálním osciloskopem Agilent 54622D pro další vyhodnocení.

Pro generování ultrazvuku byl použit komerční litium niobátový měnič firmy Panametrics typu V202-RM se základní frekvencí 10MHz bez předsádky pro vlny podélné a pro příčné vlny měnič upravený ze zpožďovacího vedení rozměrů 7x14x25 mm, s převodníkem z LiNbO₃, se skleněným zpožďovacím vedením pracující na základní frekvenci 22 MHz [2], [8]

4.1.2. Rychlost zvuku

Rychlost zvuku v pevných látkách může být odvozena z pozorovaného času šíření $\Delta\tau$, tzv. doby průletu „time of flight“ ultrazvukového impulsu nebo souboru kmitů, nazývaných „tone burst“ vzorkem tloušťky t . V případě použití jedné ultrazvukové sondy je dráha ultrazvuku určena šířením vzruchu tam a zpět vzorkem, tzv. „round trip“. Rychlost lze určit při spojitém i impulsovém vysílání ultrazvuku podle vztahu [2], [9]

$$v = \frac{2t}{\Delta\tau}. \quad (4.1)$$

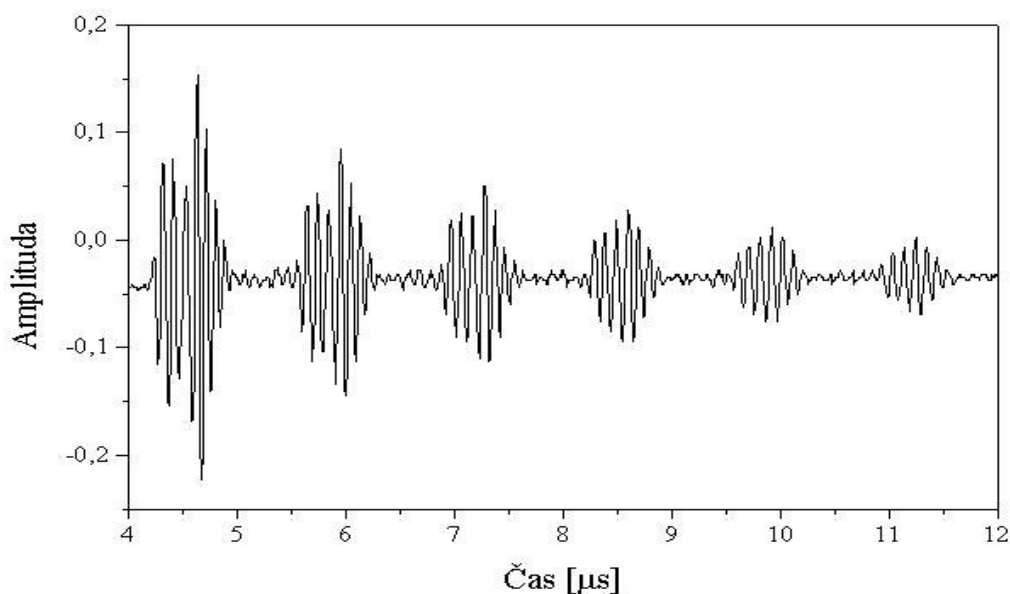
V případě, že je frekvenční závislost fázové rychlosti (disperse) nevýznamná, dává metoda doby letu dobrou aproximaci, jak fázové, tak grupové rychlosti. Řešením pohybové rovnice pro kontinuum pak dostaneme vyjádření složek tenzoru elastického modulu z naměřených rychlostí ultrazvuku.

4.1.3. Modifikace měření odezvy

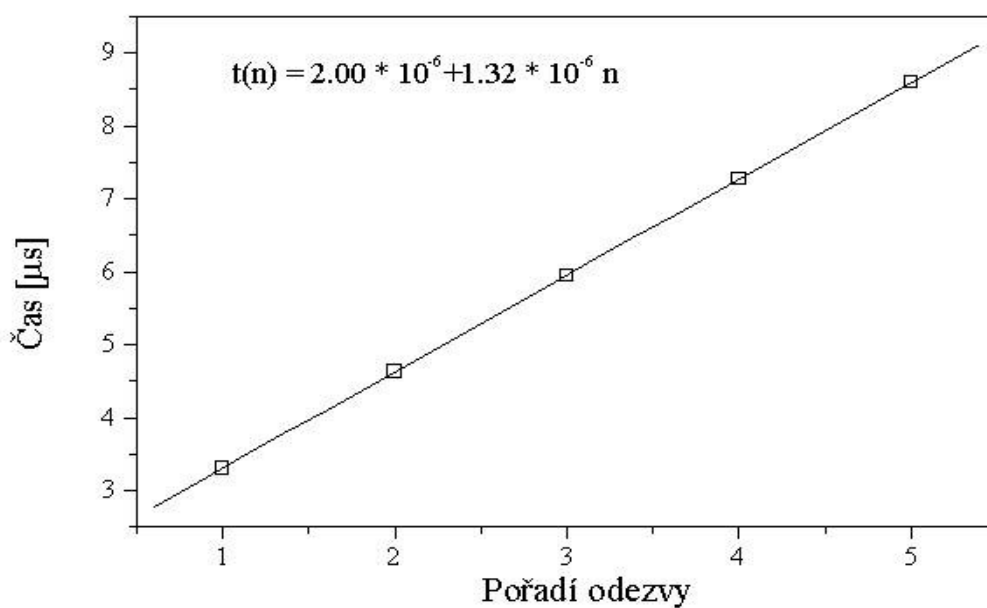
Měření časové odezvy na může být modifikováno pro různé účely použitím jedné nebo dvou sond, využitím zpožďovací linky či úhlových sond [8]. V našem případě pracujeme s odrazovou metodou s jednou sondou případně s použitím prodlužovacího vedení.

4.1.4. Výsledky měření časové odezvy

Pro zajištění co nejpřesnějšího odečtu doby průletu jsme pracovali s vysokofrekvenční odezvou měřícího signálu a odečítali jsme několik odpovídajících maxim po sobě jdoucích odezev, viz. Obr. 4.3. Naměřené časy jednotlivých maxim (píků) jsme zpracovali pomocí lineární regrese jak vidíme na dalším Obr. 4.4. Směrnice této lineární regrese odpovídá střední době průletu mezi několika naměřenými odezvami.



Obr. 4.3 Vysokofrekvenční násobná odezva budícího pulsu



Obr. 4.4 Lineární regrese

4.2. Vzorky

4.2.1 Rozměry, typy a vzhled vzorků

Geometrické rozměry použitých vzorků jsme určili digitálním mikrometrem s udávanou přesností 0,002 mm. Metodou opakovaných měření byly určeny hodnoty tloušťky (délky) vzorků a zapsány do přehledné tabulky 4.1. Krajiné chyby měření byly stanoveny pro pravděpodobnost 95 % [6]. Vzhled vlastních vzorků je zachycen na obrázcích 4.5 - 4.7.

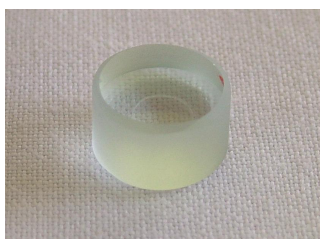
Vzorek 1 představuje běžné tabulové sklo, které se v odborné terminologii vzhledem ke způsobu výroby nazývá „float“. Vzorek 2 je láhvové (obalové) sklo. Vzorek 3 je křišťálové olovnaté sklo. Vzorek 4 je jiný druh tabulového skla. Vzorek 5 je opět tabulové sklo ve tvaru slabé desky a tedy vhodnější pro ultrazvuková měření, ve smyslu uvedené teorie v kapitole 3, kde předpokládáme systém se zanedbatelnou tloušťkou vzhledem plošným rozměrům systému. Vzorek 6 představuje již jiný druh materiálu, který je na rozdíl od amorfního skla, polykrystalický. Jedná se o vzorek běžné technické oceli viz. tab. 4.1. Vzorek 7 je ložisková ocel, „malý“ váleček z ložiska. Vzorek 8 je stejný materiál, ale jedná se o „velký“ váleček do ložiska. Vzorek 9, disk, je vyrobený z titanu. Bohužel vzhledem k jeho provedení, drsnosti a planparallelitě jeho povrchů, nebylo možné měření rychlosti příčné vlny.

Tab. 4.1 Rozměry a materiál vzorků

vzorek č.	materiál	tvar	průměr d [mm]	tloušťka t [mm]
1	sklo - float	váleček	15,6	9,955 ± 0,005
2	sklo - obalové	váleček	15,6	10,019 ± 0,007
3	sklo - křišťál	váleček	20	19,77 ± 0,02
4	sklo - float	váleček	20,3	18,450 ± 0,005
5	sklo – float	čtvercová destička	40 x 40	3,836 ± 0,005
6	ocel – běžná	disk *	10	3,017 ± 0,004
7	ocel - ložisková	váleček **	20	20,000 ± 0,003
8	ocel - ložisková	váleček **	30	30,000 ± 0,003
9	titan – grade 5	disk	39,5	6,39 ± 0,05

* Ocel pro všeobecné použití ČSN 11 109 DIN: W: 10715, EN 10 087

** Ložisková Ocel ČSN 14 109, AISI: 52100 DIN: W.13505, DIN 17 230



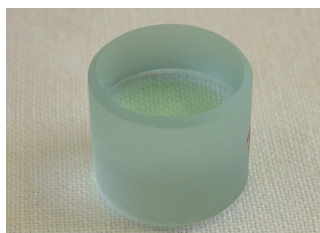
Obr. 4.5 Vzorek 1



Vzorek 2



Vzorek 3



Obr. 4.6 Vzorek 4



Vzorek 5



Vzorek 6



Obr. 4.7 Vzorek 7



Vzorek 8



Vzorek 9

4.2.2 Hustota vzorků

Pro výpočet hustoty vzorků použijeme hydrostatickou metodu, která využívá *Archimédova zákona* [3], [6].

Pro výpočet hustoty vzorků bylo nutné určit hustotu vzduchu a destilované vody při dané teplotě a tlaku pomocí fyzikálních tabulek. Konkrétní hodnoty pro naše měření jsou v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 Hustota vzduchu a vody při pokojové teplotě

	ρ [kg m ⁻³]	p [kPa]	T [°C]
vzduch	1,197	101,3	22
voda	997,994	101,3	21

Hydrostatická metoda

Je-li pevná látka homogenní, můžeme určit její hustotu jako konstantu. Jelikož působí na tělesa aerostatická vztlaková síla, nemůžeme pro přesná měření tuto skutečnost zanedbat.

M_1 označíme hmotnost závaží při vyvážení na vzduchu za použití rovnoramenných vah. M_2 je hmotnost závaží při vyvážení ve vodě. Pro vážení na vzduchu dostáváme rovnici rovnováhy sil

$$mg - \frac{m\rho_{vz}g}{\rho} = M_1g - \frac{M_1\rho_{vz}g}{\rho_z} \quad (4.2)$$

a pro vážení ve vodě

$$mg - \frac{m\rho_{vody}g}{\rho} = M_2g - \frac{M_2\rho_{vz}g}{\rho_z}, \quad (4.3)$$

kde m označujeme hmotnost tělesa, ρ hustotu tělesa, ρ_{vz} hustotu vzduchu, ρ_{vody} hustotu vody a ρ_z hustotu závaží. Po upravení rovnic rovnováhy sil dostáváme pro hledanou hustotu tělesa vztah [3], [6].

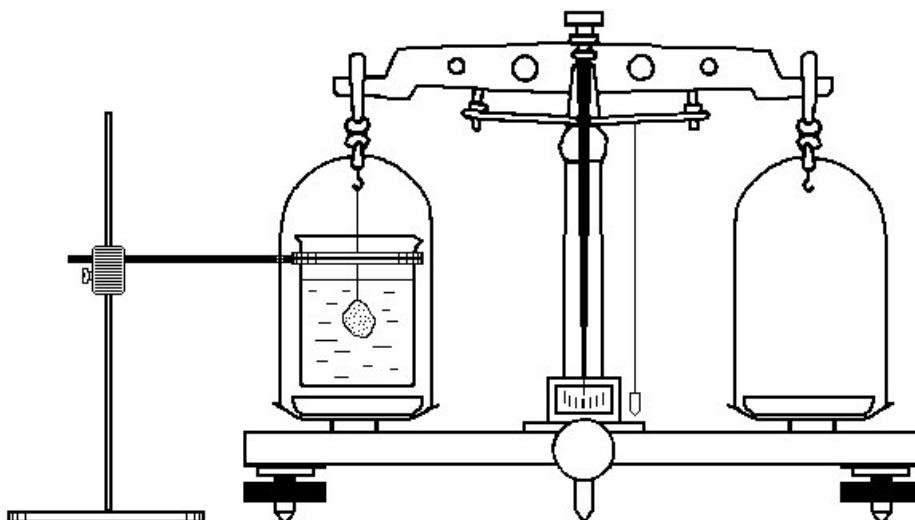
$$\rho = \frac{M_1\rho_{vody} - M_2\rho_{vz}}{M_1 - M_2} = \frac{M_1(\rho_{vody} - \rho_{vz})}{M_1 - M_2} + \rho_{vz} \quad (4.4)$$

Krajní chybu hustoty vzorků určíme pomocí lineárního zákona hromadění chyb

$$\bar{\kappa}(\rho) = \left| \left(\frac{\partial \rho}{\partial M_1} \right) \bar{\kappa}(M_1) \right| + \left| \left(\frac{\partial \rho}{\partial M_2} \right) \bar{\kappa}(M_2) \right|, \quad (4.5)$$

kde jednotlivé parciální derivace vypočteme z následujících vztahů

$$\frac{\partial \rho}{\partial M_1} = \frac{-M_2(\rho_{vody} - \rho_{vz})}{(M_1 - M_2)^2} \quad \frac{\partial \rho}{\partial M_2} = \frac{-M_1(\rho_{vody} - \rho_{vz})}{(M_1 - M_2)^2}. \quad (4.6)$$



Obr. 4.8. Hydrostatická metoda

Tabulka 4.3 Vlastní měření pro studované vzorky 1 - 9.

Vzorek č.	M_1 [kg]	M_2 [kg]	ρ [kg m ⁻³]
1	$0,00447 \pm 0,00003$	$0,00268 \pm 0,00003$	2490 ± 70
2	$0,00476 \pm 0,00003$	$0,00289 \pm 0,00003$	2540 ± 70
3	$0,01571 \pm 0,00003$	$0,00959 \pm 0,00003$	2560 ± 20
4	$0,01473 \pm 0,00003$	$0,00888 \pm 0,00003$	2510 ± 20
5	$0,01519 \pm 0,00003$	$0,00914 \pm 0,00003$	2500 ± 20
6	$0,00184 \pm 0,00003$	$0,00161 \pm 0,00003$	7980 ± 2000
7	$0,04841 \pm 0,00003$	$0,04220 \pm 0,00003$	7770 ± 70
8	$0,16340 \pm 0,00004$	$0,14244 \pm 0,00003$	7770 ± 30
9	$0,03284 \pm 0,00003$	$0,02556 \pm 0,00003$	4497 ± 30

4.2.3. Naměřené odezvy odražených ultrazvukových vln

Doby průletu τ včetně chyb studovaných vzorků byly určeny pomocí lineární regrese v kapitole 4.1.4. na obr. 4.4.

Výsledky měření časové odezvy jednotlivých vzorků nalezneme v tabulce 4.4 a odpovídající ultrazvukové odezvy pro podélné a příčné vlny vidíme na následujících obrázcích 4.9. až 4.42.

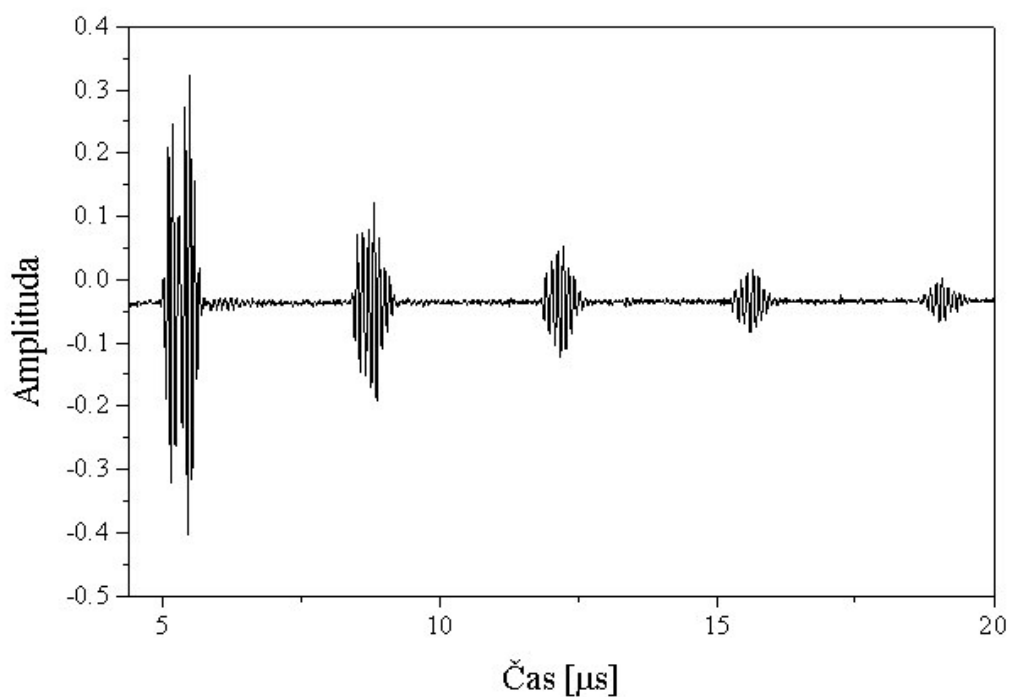
Tabulka 4.4 Doby průletů podélné a příčné vlny

Vzorek č.	τ_l [μ s] - podélné vlny	τ_t [μ s] - příčné vlny
1	$3,40 \pm 0,01$	$5,75 \pm 0,01$
2	$3,41 \pm 0,01$	$5,74 \pm 0,01$
3	$7,01 \pm 0,01$	$11,76 \pm 0,01$
4	$6,31 \pm 0,01$	$10,66 \pm 0,05$
5	$1,32 \pm 0,01$	$2,26 \pm 0,02$
6	$1,03 \pm 0,01$	$1,89 \pm 0,02$
7	$6,82 \pm 0,02$	$12,52 \pm 0,02$
8	$10,18 \pm 0,02$	$18,81 \pm 0,02$
9	$2,09 \pm 0,02$	*

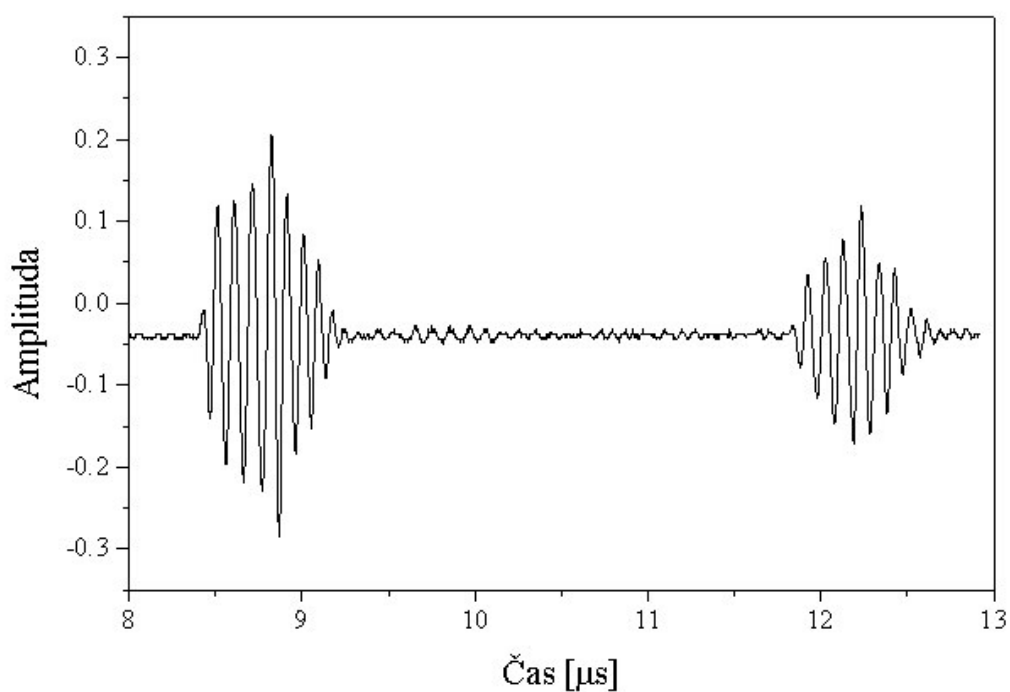
* Z důvodu nekvalitního provedení vzorku (drsnoty povrchu a nedodržení planparalelních stěn) docházelo k vysokému útlumu a deformaci odezvy příčné vlny.

4.2.3.1. Vysokofrekvenční násobná odezva budícího pulsu pro podélné vlnění

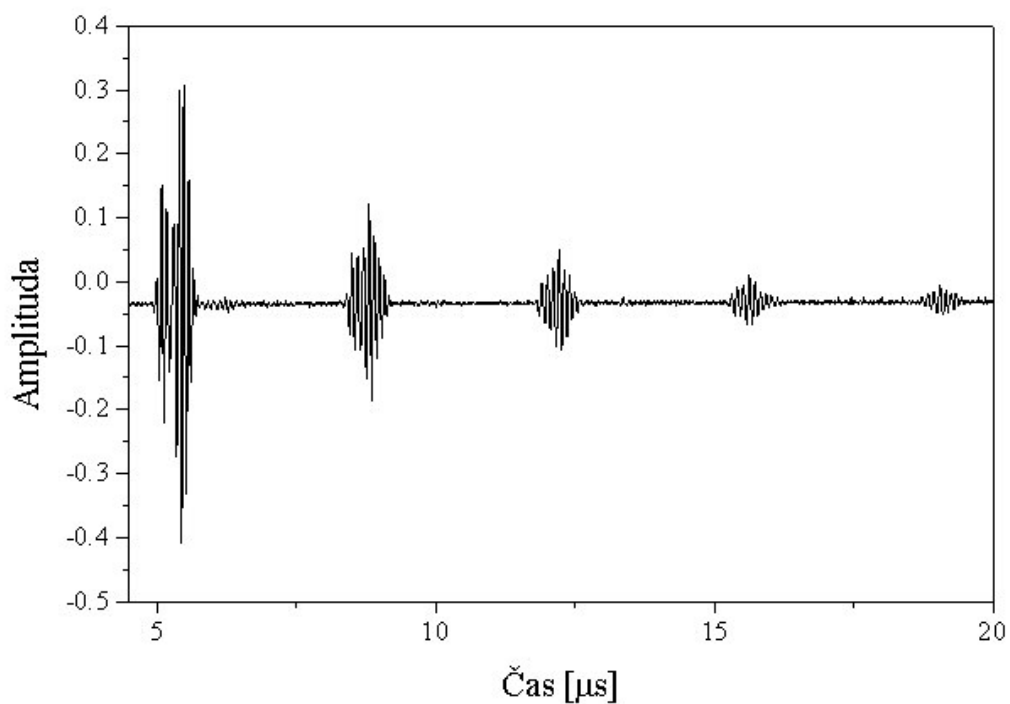
V tomto případě jsme využívali sondu bez předsádky. Vzhledem k velikosti (tloušťce) vzorků jsme neměli problém s odlišením odezev nízkého řádu s ohledem na přechodové efekty mezi sondou a vzorkem. Odezvy podélných vln jsou zachyceny pro všechny vzorky na obrázcích 4.9 až 4.26.



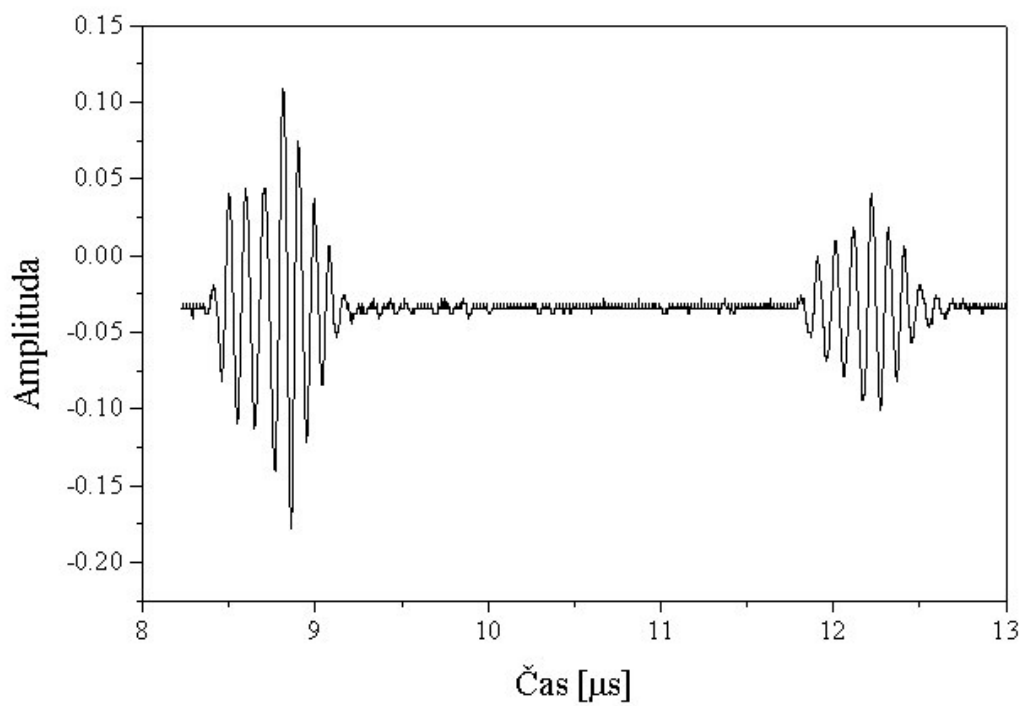
Obr. 4.9. Vzorek č.1 - podélné vlnění - sklo float - celkový náhled



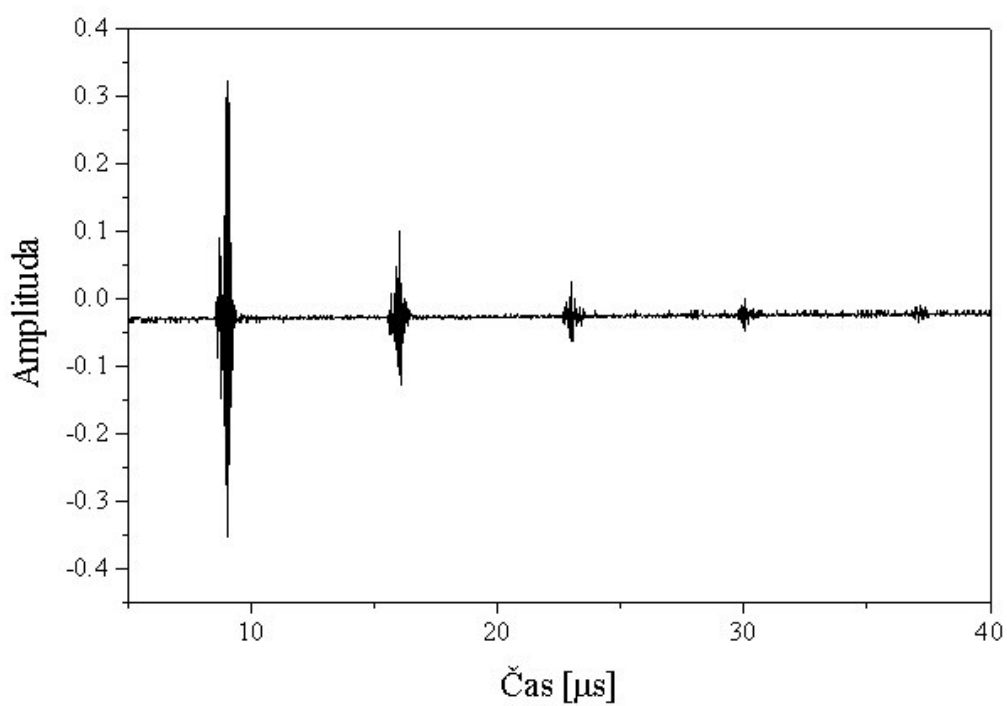
Obr. 4.10 Vzorek č.1 - podélné vlnění - sklo float - detailní náhled



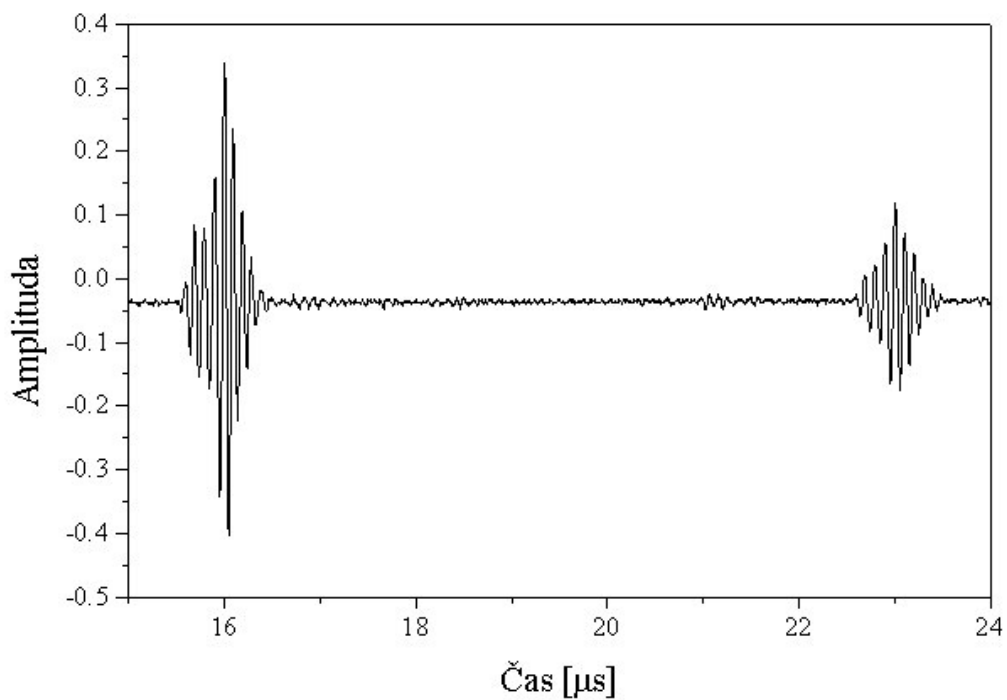
Obr. 4.11 Vzorek č.2 - podélné vlnění - sklo obalové - celkový náhled



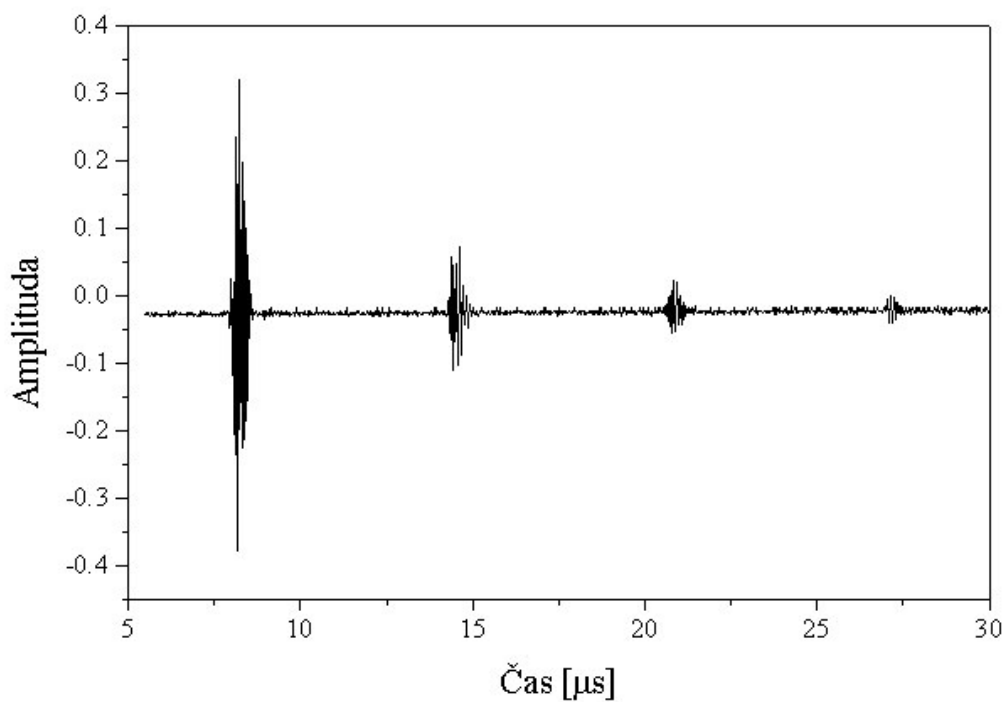
Obr. 4.12 Vzorek č.2 - podélné vlnění - sklo obalové - detailní náhled



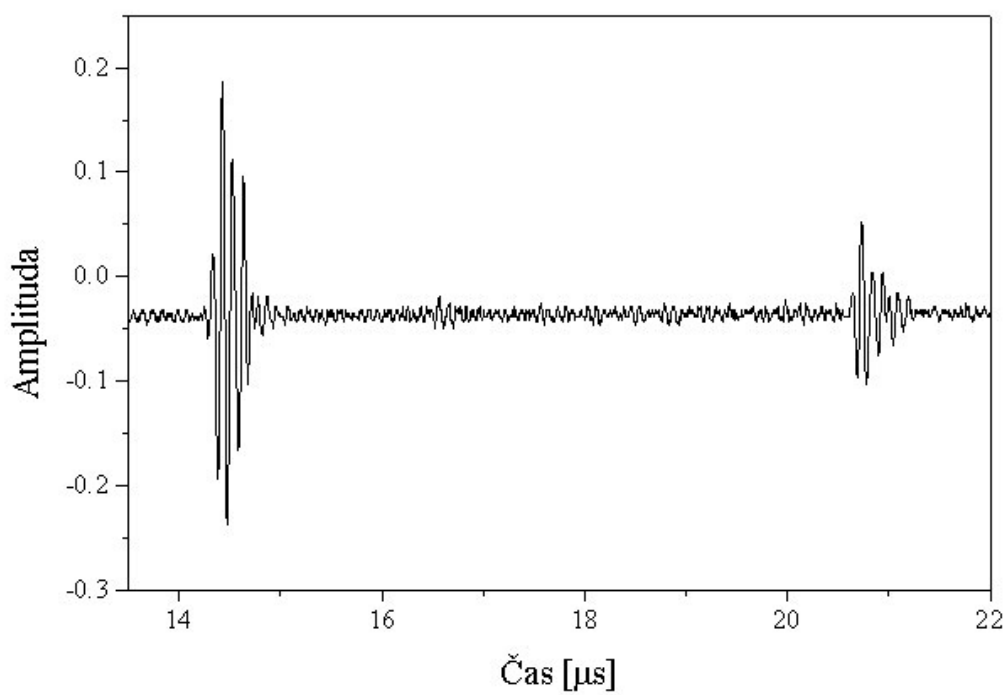
Obr. 4.13 Vzorek č.3 - podélné vlnění - sklo křišťál - celkový náhled



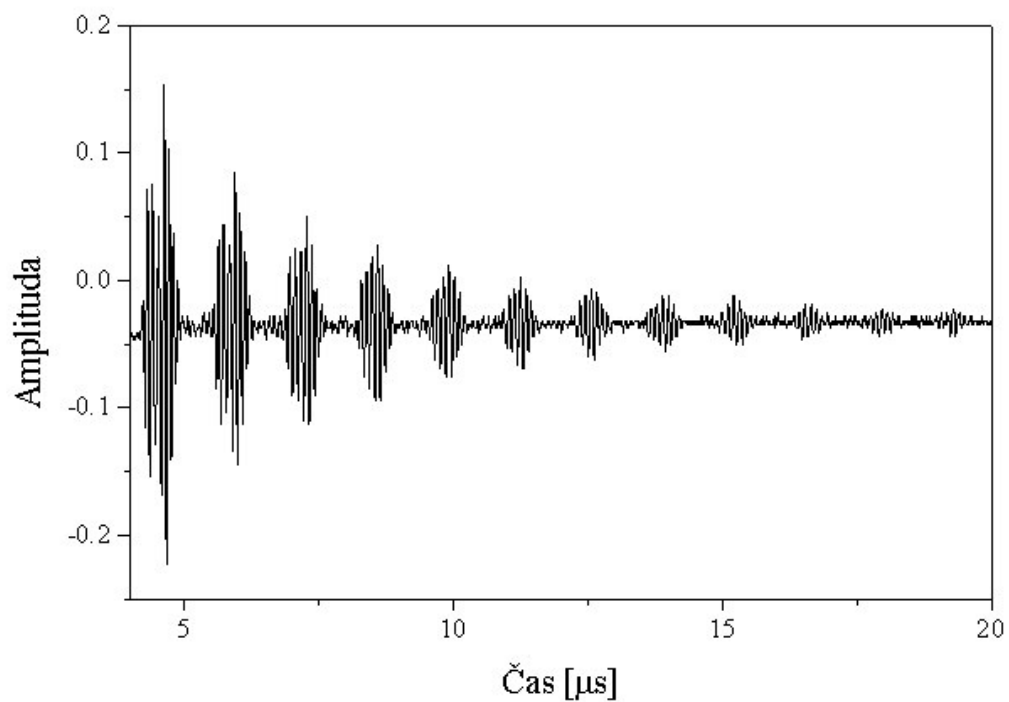
Obr. 4.14 Vzorek č.3 - podélné vlnění - sklo křišťál - detailní náhled



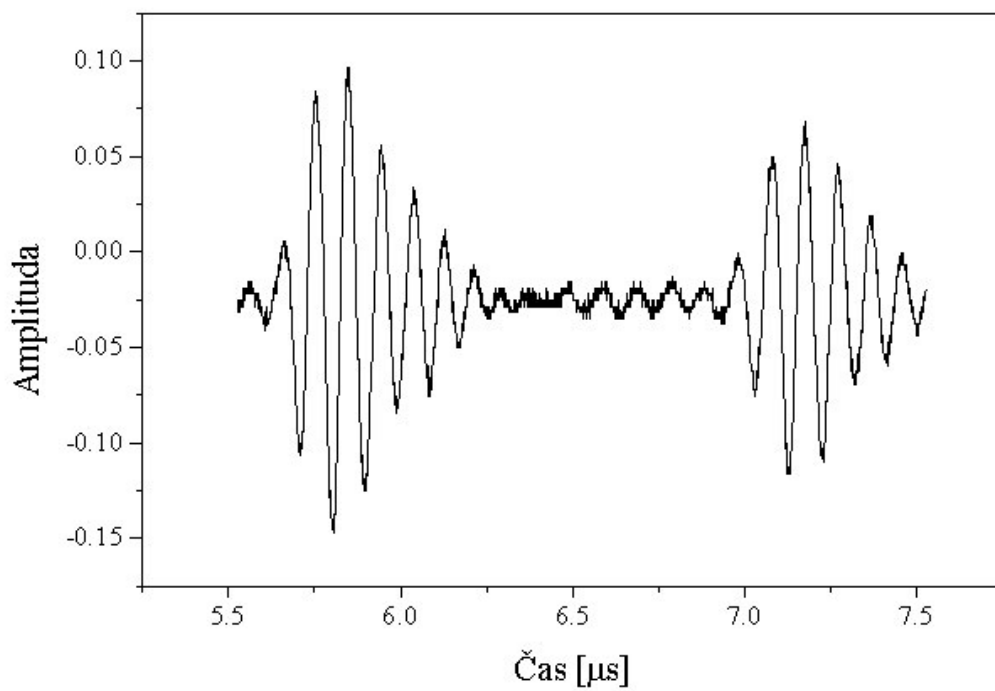
Obr. 4.15 Vzorek č.4 – podélné vlnění - sklo float - celkový náhled



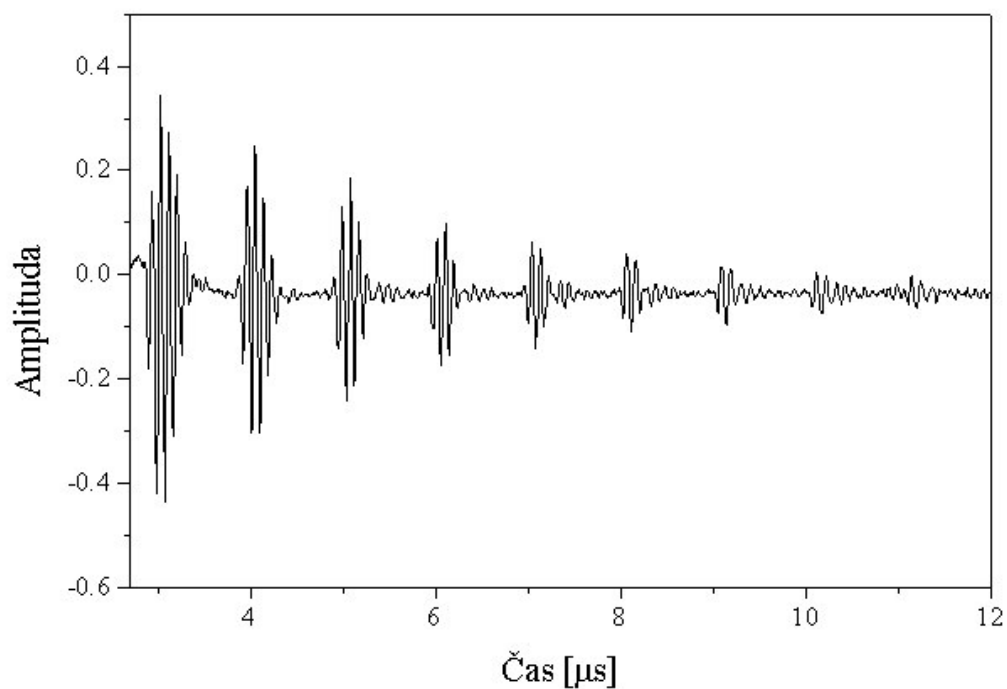
Obr. 4.16 Vzorek č.4 – podélné vlnění - sklo float - detailní náhled



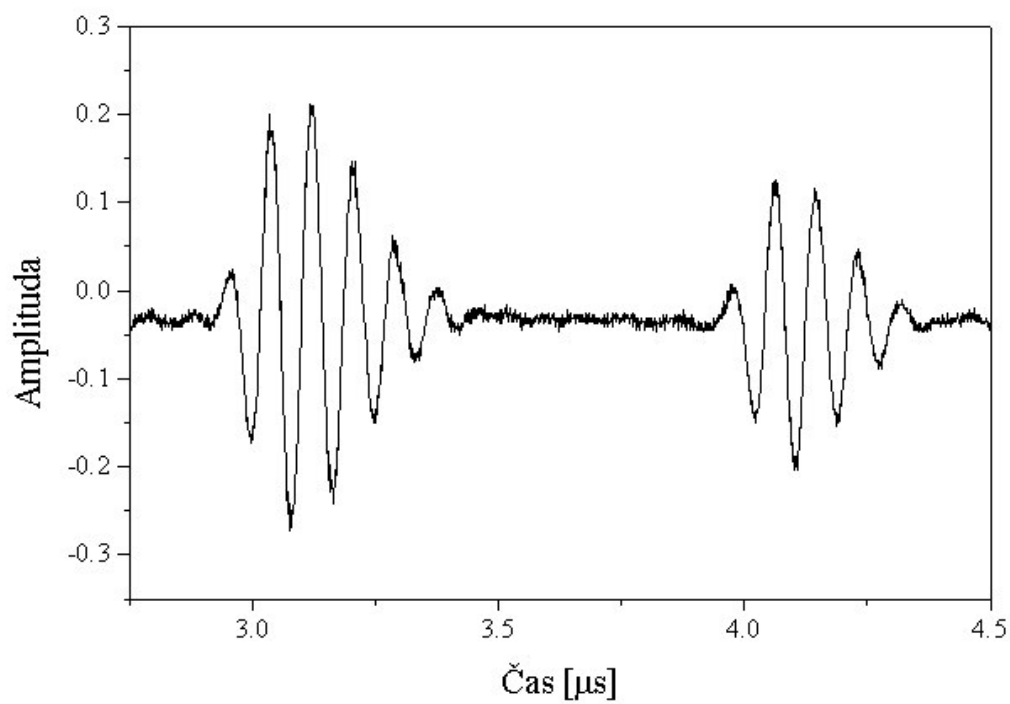
Obr. 4.17 Vzorek č.5 - podélné vlnění - sklo float - celkový náhled



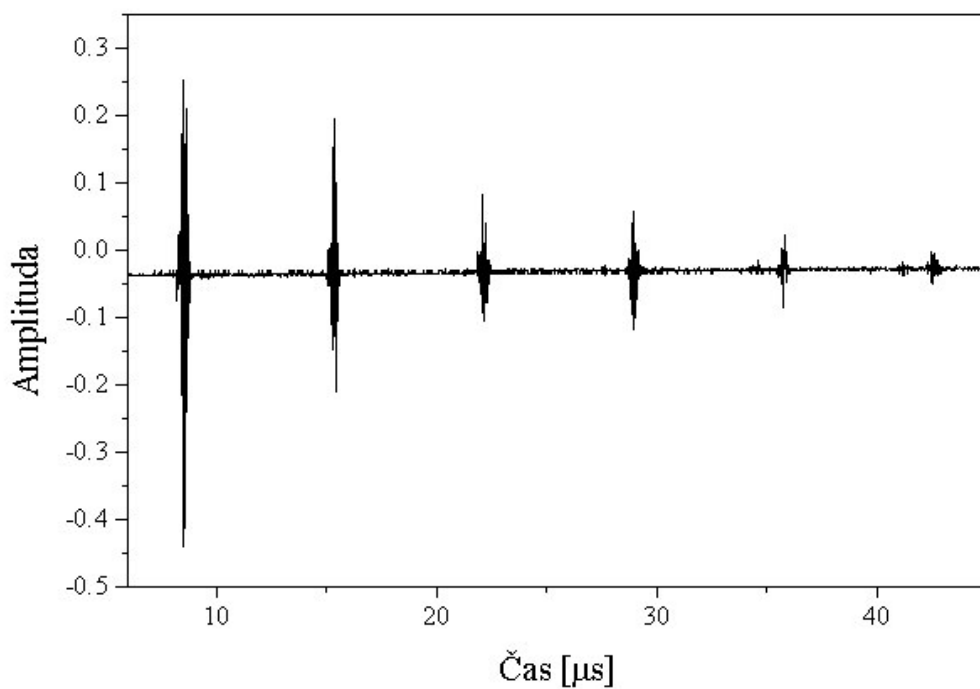
Obr. 4.18 Vzorek č.5 - podélné vlnění - sklo float - detailní náhled



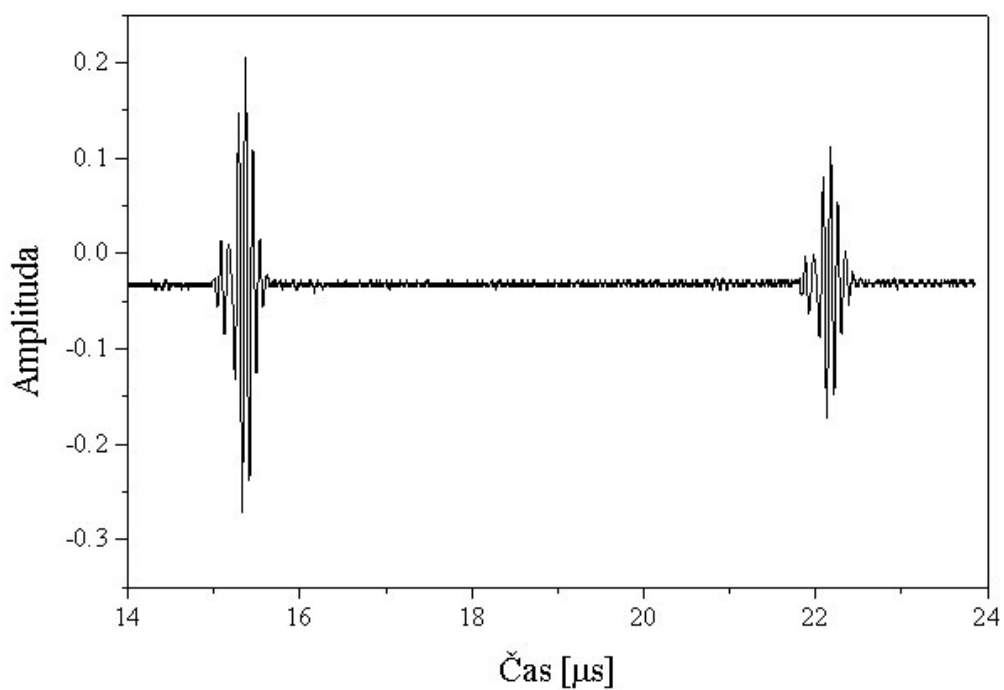
Obr. 4.19 Vzorek č.6 - podélné vlnění – ocel běžná - celkový náhled



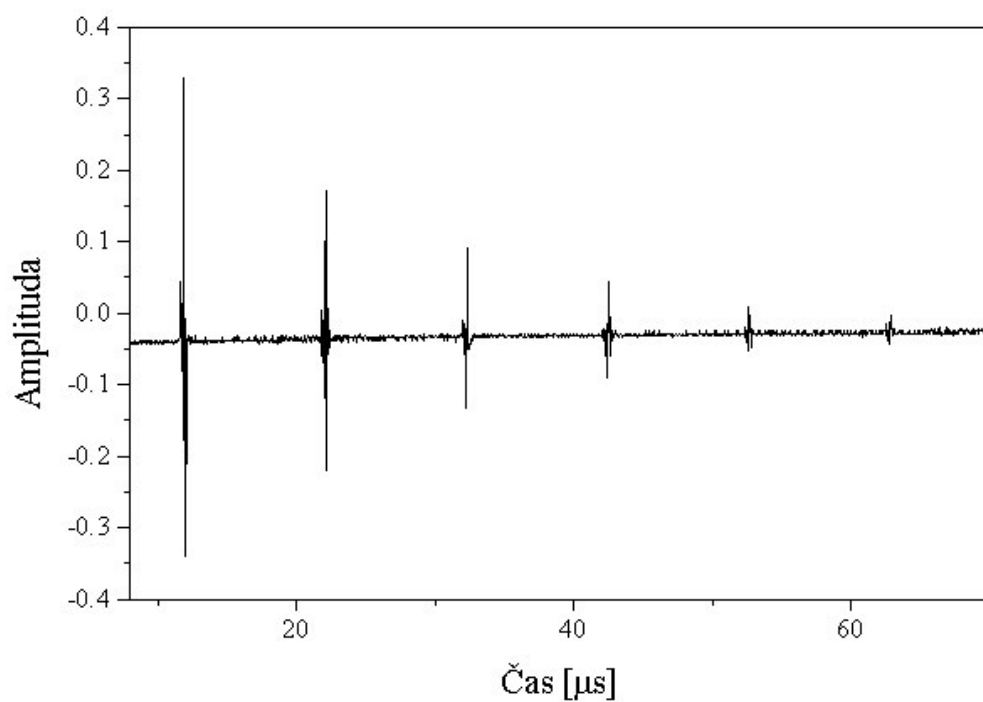
Obr. 4.20 Vzorek č.6 - podélné vlnění – ocel běžná - detailní náhled



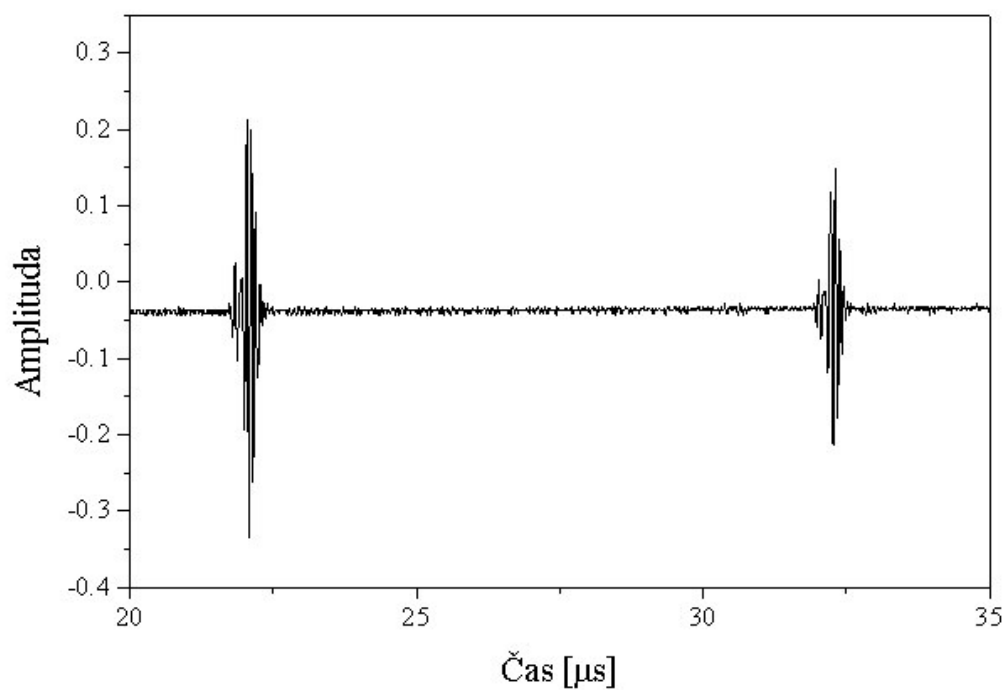
Obr. 4.21 Vzorek č.7 - podélné vlnění – ocel ložisková - celkový náhled



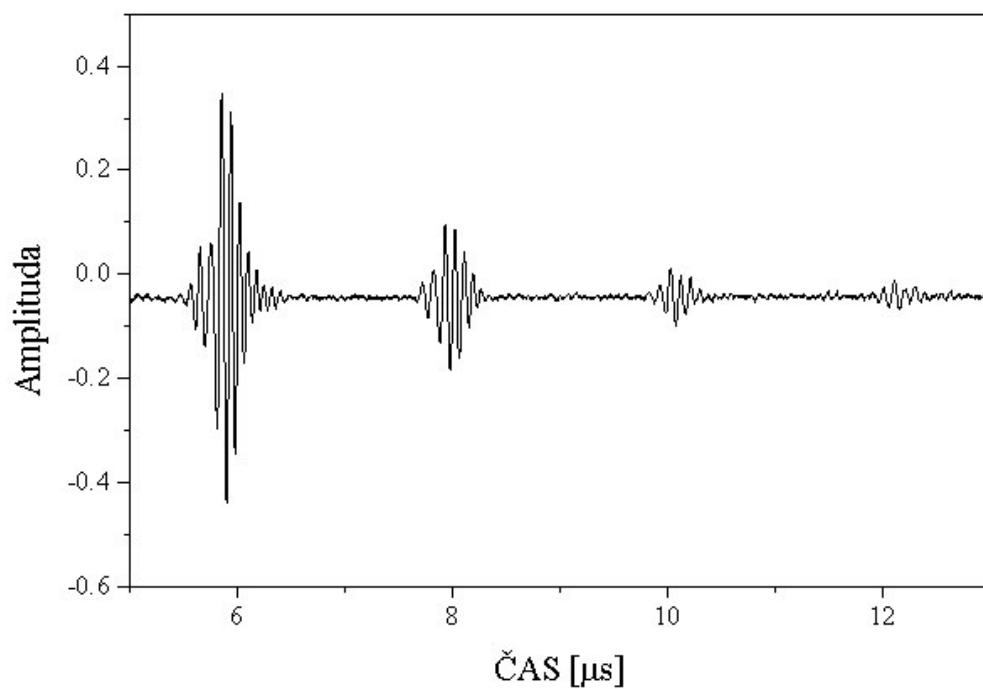
Obr. 4.22 Vzorek č.7 - podélné vlnění – ocel ložisková - detailní náhled



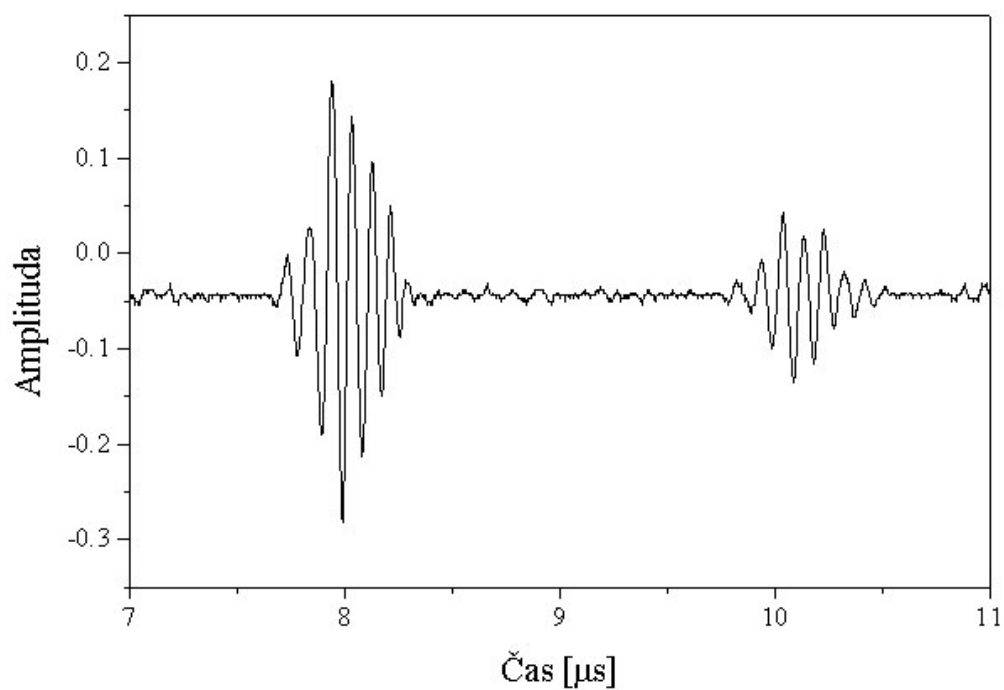
Obr. 4.23 Vzorek č.8 - podélné vlnění – ocel ložisková - celkový náhled



Obr. 4.24 Vzorek č.8 - podélné vlnění – ocel ložisková - detailní náhled



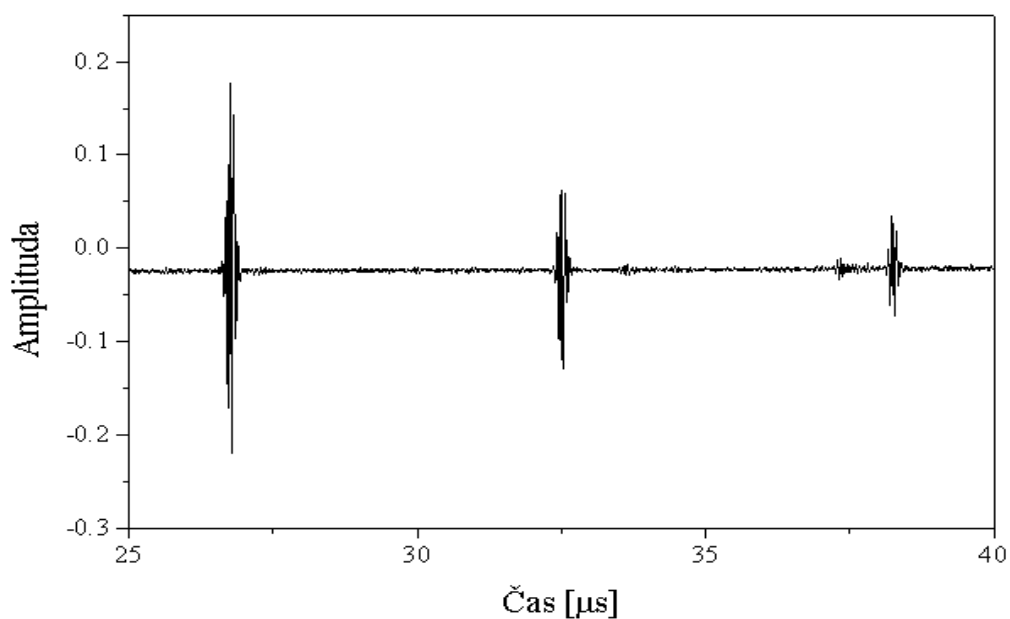
Obr. 4.25 Vzorek č.9 - podélné vlnění - titan - celkový náhled



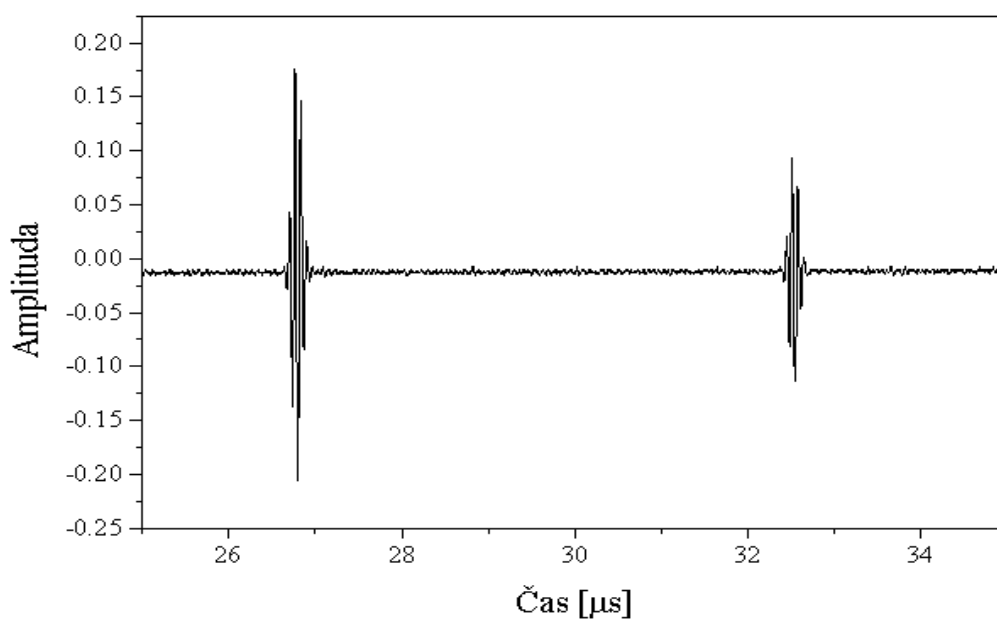
Obr. 4.26 Vzorek č.9 - podélné vlnění - titan - detailní náhled

4.2.3.2. Vysokofrekvenční násobná odezva budícího pulsu pro příčné vlnění

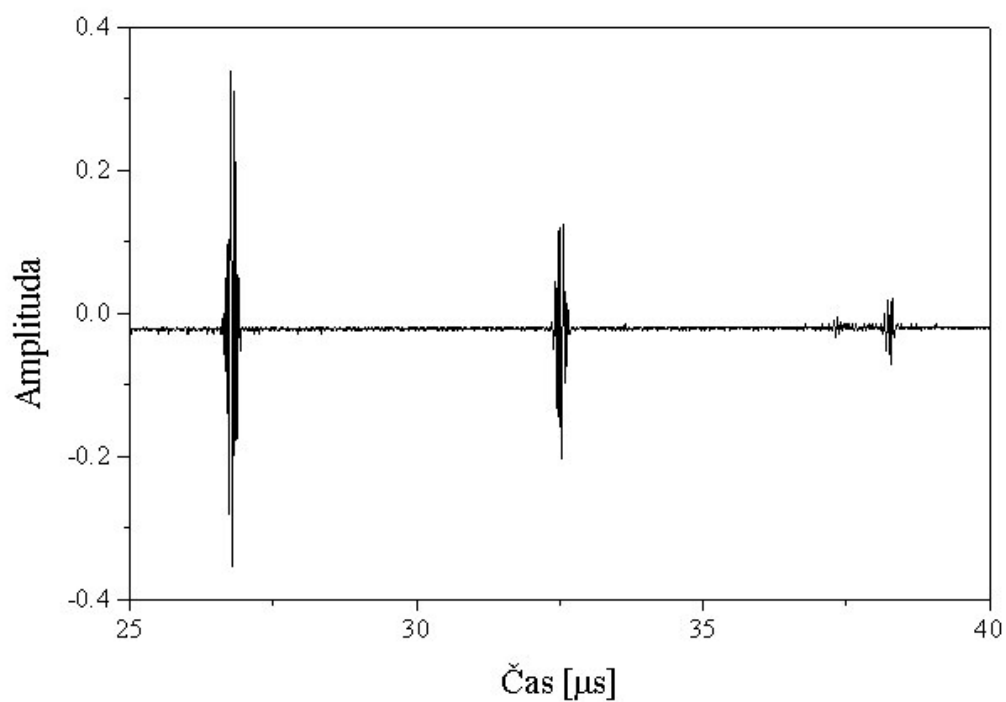
Vzhledem k použití ultrazukové sondy s předsádkou srovnatelných rozměrů s velikostí některých vzorků, a tedy i srovnatelnou odezvou, jsme museli násobné odezvy vzorku odlišit od odezev předsádky. V grafech obr. 4.33, 4.34 a 4.39 až 4.42 jsou odezvy vzorků očíslovány.



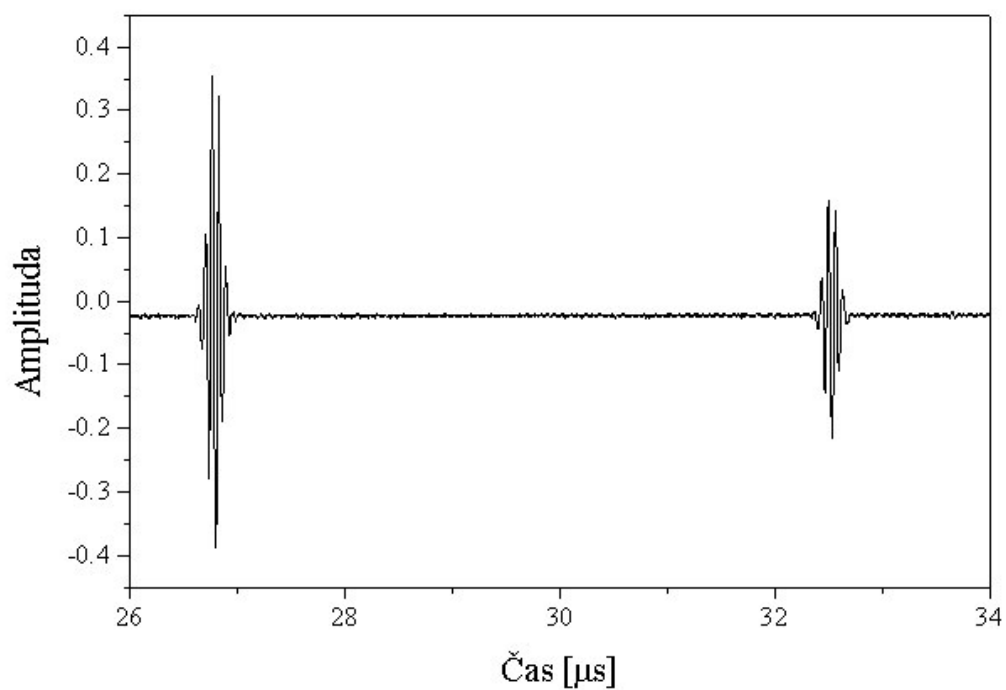
Obr. 4.27 Vzorek č.1 - příčné vlnění - sklo float - celkový náhled



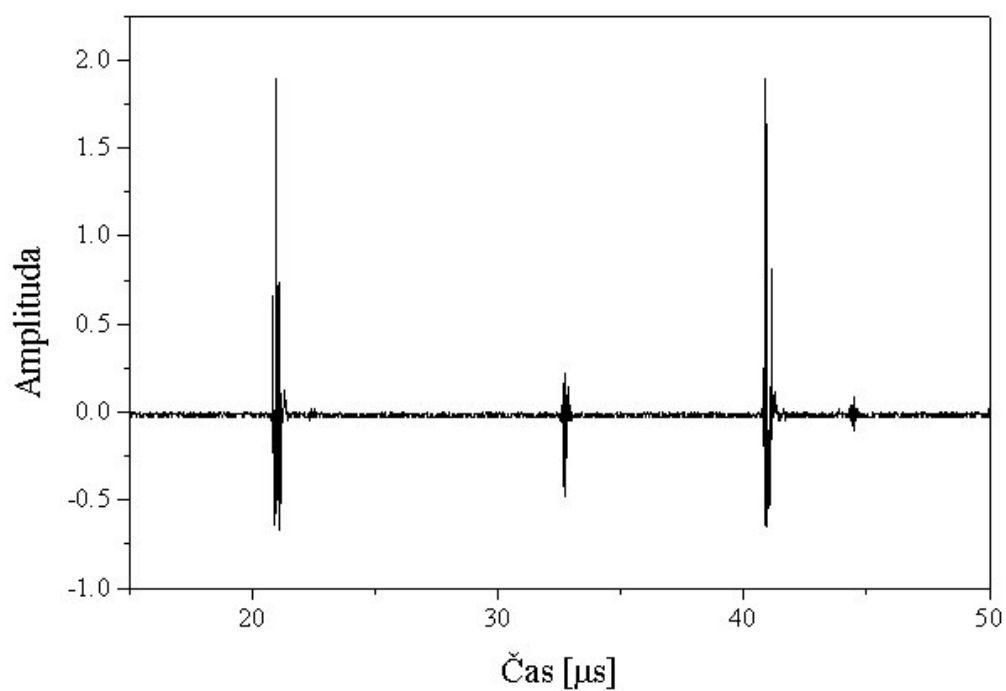
Obr. 4.28 Vzorek č.1 - příčné vlnění - sklo float - detailní náhled



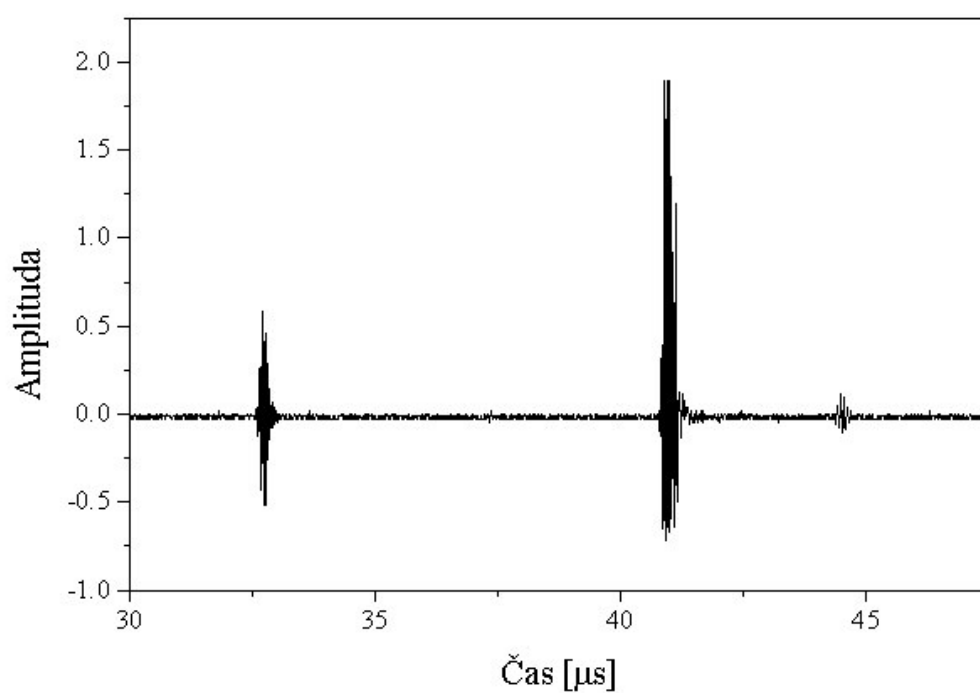
Obr. 4.29 Vzorek č.2 - příčné vlnění - sklo obalové - celkový náhled



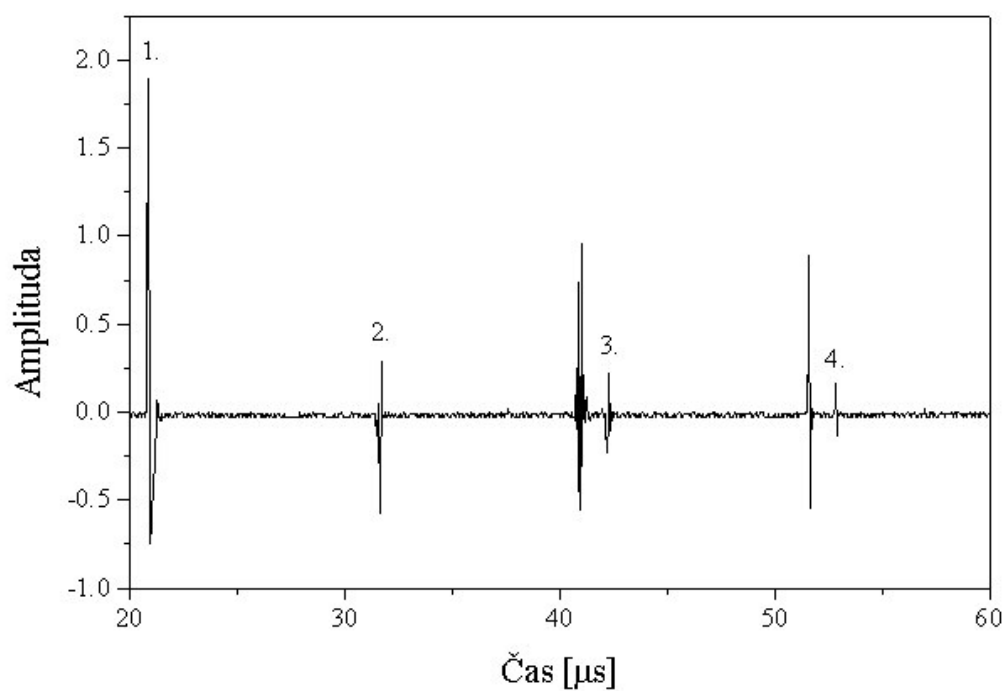
Obr. 4.30 Vzorek č.2 - příčné vlnění - sklo obalové - detailní náhled



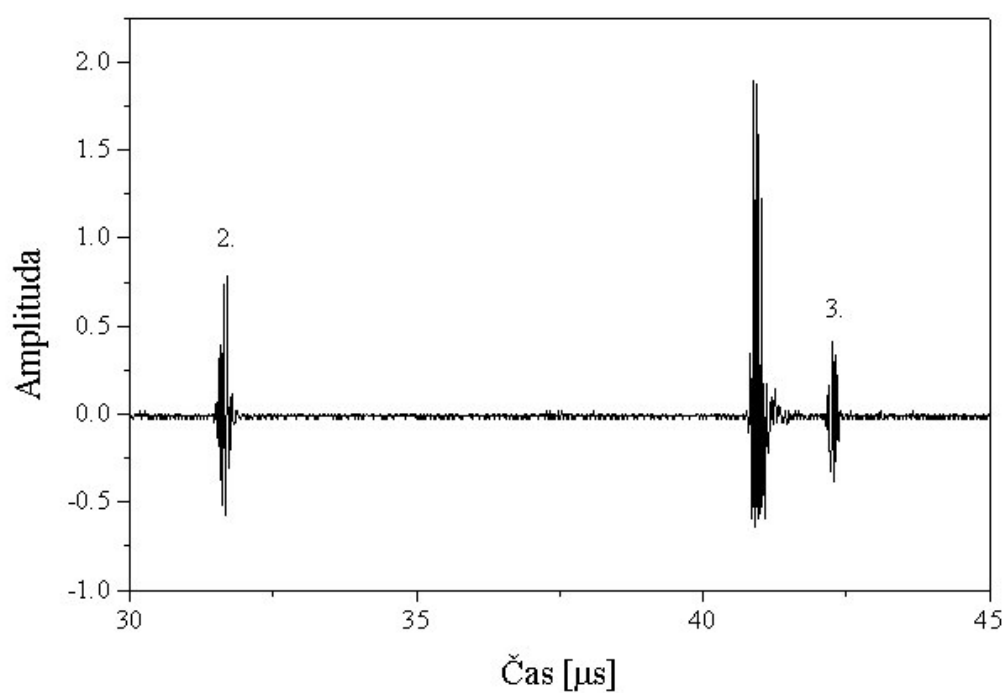
Obr. 4.31 Vzorek č.3 - příčné vlnění - sklo křišťál - celkový náhled



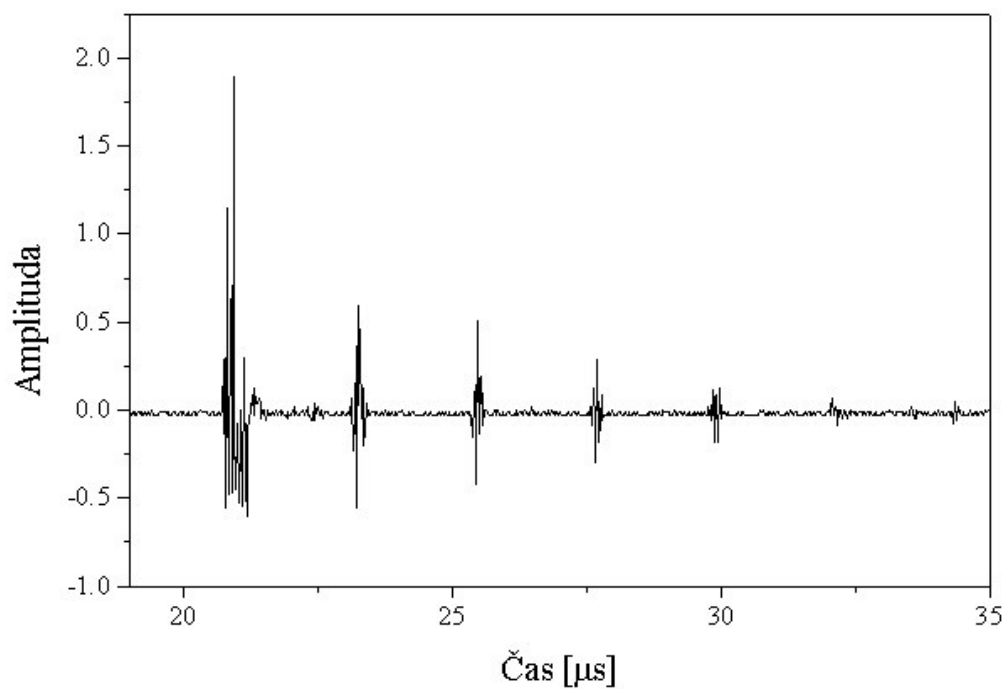
Obr. 4.32 Vzorek č.3 - příčné vlnění - sklo křišťál - detailní náhled



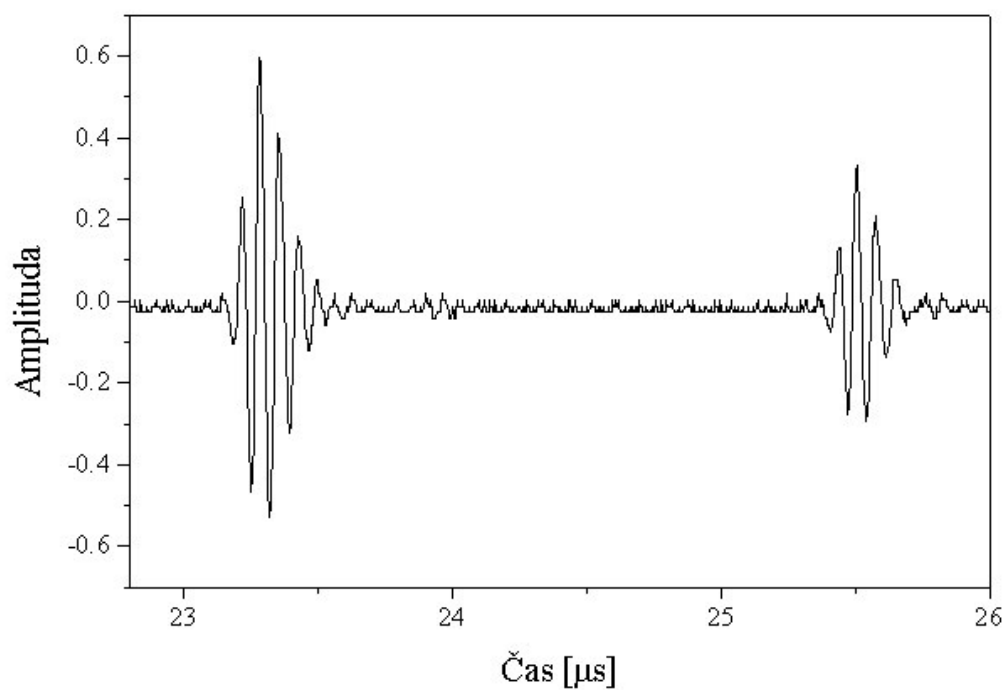
Obr. 4.33 Vzorek č.4 – příčné vlnění - sklo float - celkový náhled



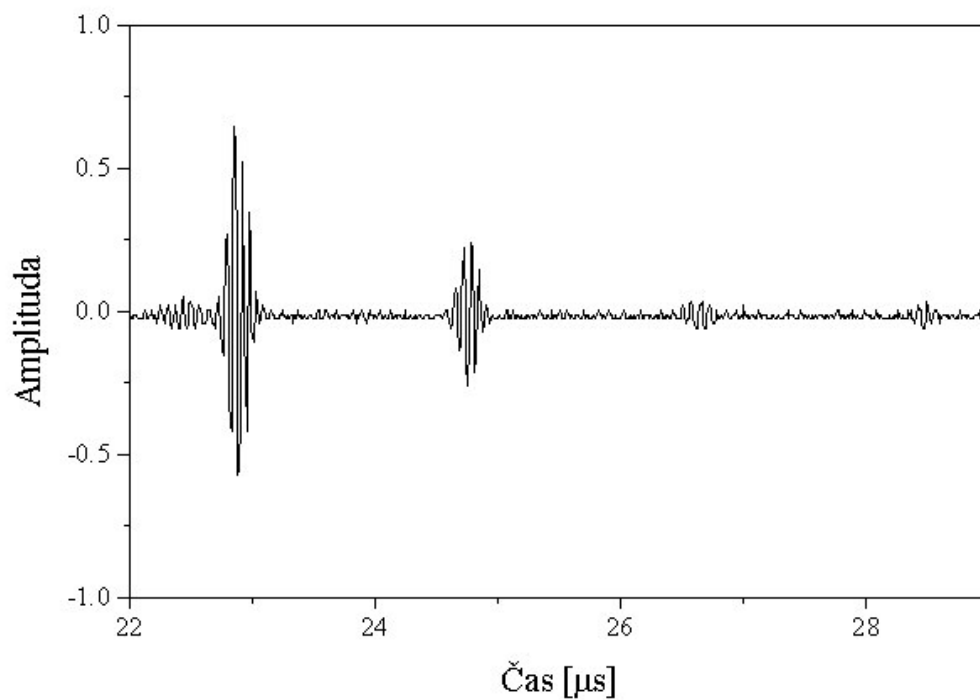
Obr. 4.34 Vzorek č.4 – příčné vlnění - sklo float - detailní náhled



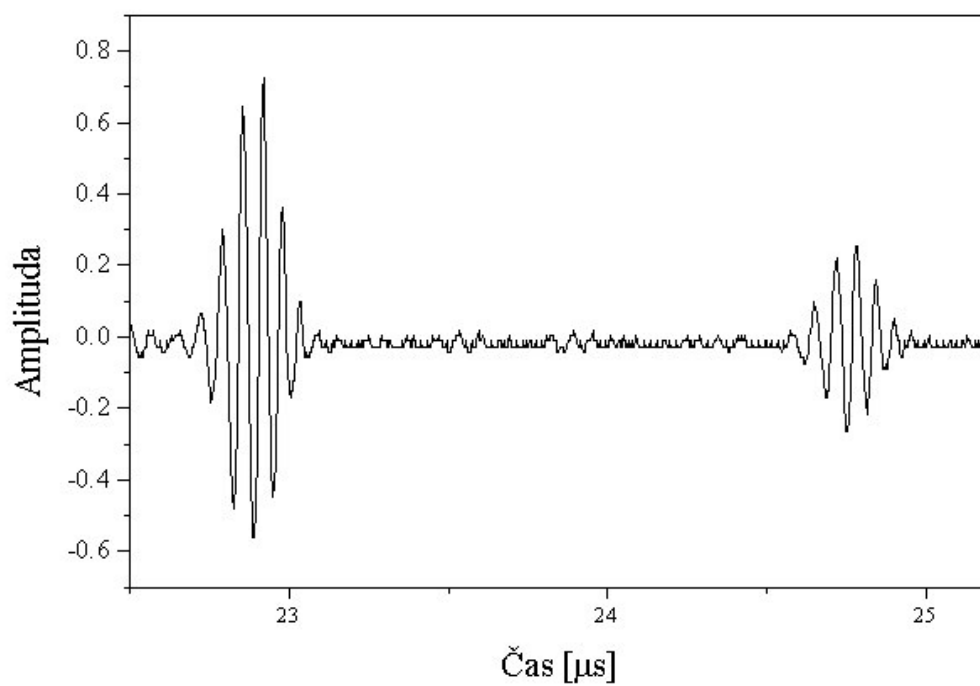
Obr. 4.35 Vzorek č.5 - příčné vlnění - sklo float - celkový náhled



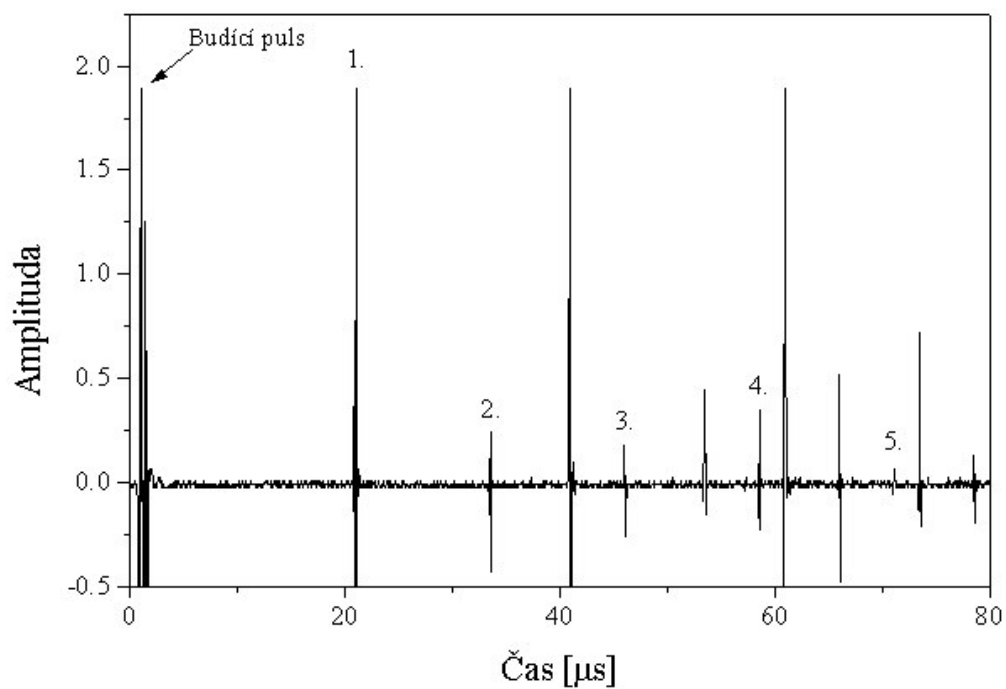
Obr. 4.36 Vzorek č.5 - příčné vlnění - sklo float - detailní náhled



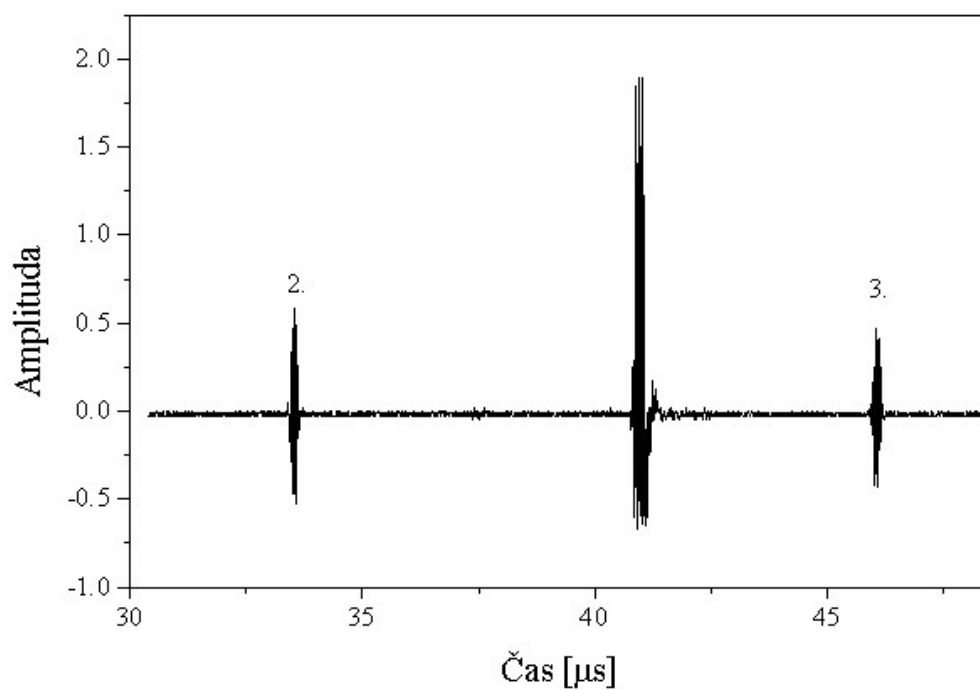
Obr. 4.37 Vzorek č.6 - příčné vlnění – ocel běžná - celkový náhled



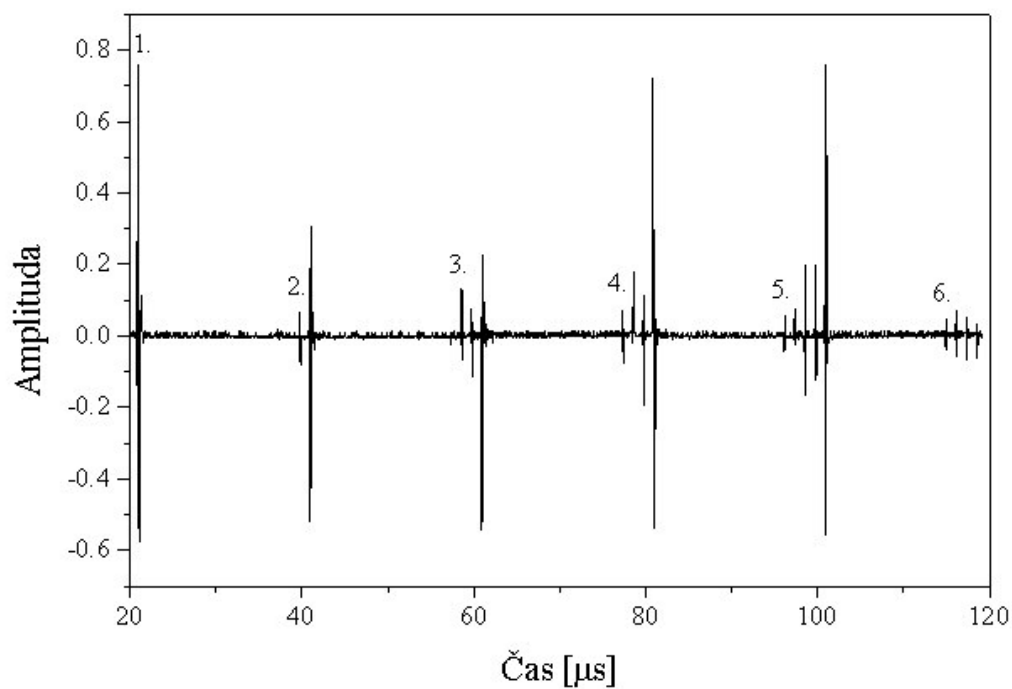
Obr. 4.38 Vzorek č.6 - příčné vlnění – ocel běžná - detailní náhled



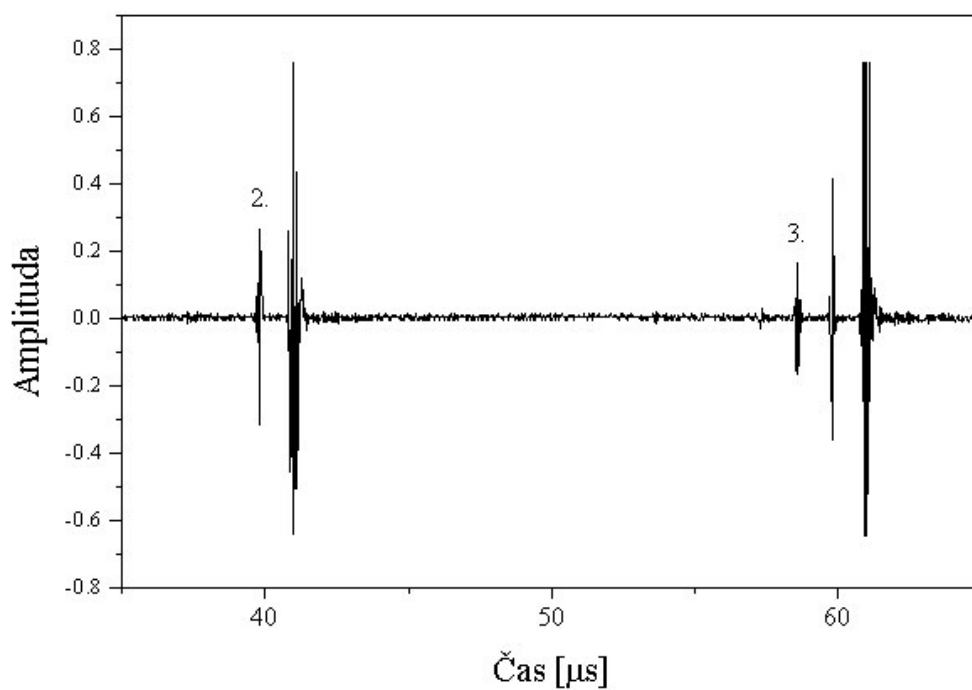
Obr. 4.39 Vzorek č.7 - příčné vlnění – ocel ložisková - celkový náhled



Obr. 4.40 Vzorek č.7 - příčné vlnění – ocel ložisková - detailní náhled



Obr. 4.41 Vzorek č.8 - příčné vlnění – ocel ložisková - celkový náhled



Obr. 4.42 Vzorek č.8 - příčné vlnění – ocel ložisková - detailní náhled

5. Zpracování naměřených dat a určení chyb měření

5.1. Výpočet rychlosti šíření ultrazvukových vln a její chyba

Rychlost šíření ultrazvuku u jednotlivých vzorků jsme vypočítali podle vztahu (4.1). Určili jsme dva druhy rychlostí pro podélné a příčné vlny z odpovídajících časů průletu. Chybu rychlostí jsme určili pomocí chyby nepřímého měření. Příslušné parciální derivace výchozích vztahů

$$\begin{array}{ll} \text{podélné vlnění} & \text{příčné vlnění} \\ v_l = \frac{2t}{\Delta\tau_l} & v_t = \frac{2t}{\Delta\tau_t}. \end{array} \quad (5.1)$$

Krajní chybu rychlosti pro podélné a příčné vlnění stanovíme pomocí lineárního zákona hromadění chyb

$$\bar{\kappa}(v_l) = \left| \frac{\partial v_l}{\partial t} \bar{\kappa}(t) \right| + \left| \frac{\partial v_l}{\partial \Delta\tau_l} \bar{\kappa}(\Delta\tau_l) \right| \quad \bar{\kappa}(v_t) = \left| \frac{\partial v_t}{\partial t} \bar{\kappa}(t) \right| + \left| \frac{\partial v_t}{\partial \Delta\tau_t} \bar{\kappa}(\Delta\tau_t) \right|, \quad (5.2)$$

kde jednotlivé parciální derivace vypočteme z následujících vztahů

$$\frac{\partial v_l}{\partial t} = \frac{2}{\Delta\tau_l} \quad \frac{\partial v_l}{\partial \Delta\tau_l} = \frac{-2t}{\Delta\tau_l^2} \quad \frac{\partial v_t}{\partial t} = \frac{2}{\Delta\tau_t} \quad \frac{\partial v_t}{\partial \Delta\tau_t} = \frac{-2t}{\Delta\tau_t^2}. \quad (5.3)$$

Tab. 5.1 Naměřené rychlosti šíření ultrazvuku pro podélnou a příčnou ultrazvukovou vlnu

vzorek č.	materiál	tvar	v_l [ms^{-1}]	v_t [ms^{-1}]
1	sklo	váleček	5860 ± 20	3470 ± 10
2	sklo	váleček	5870 ± 20	3490 ± 10
3	sklo	váleček	5640 ± 20	3360 ± 10
4	sklo	váleček	5850 ± 10	3460 ± 20
5	sklo	čtvercová destička	5810 ± 50	3400 ± 30
6	ocel	disk	5870 ± 60	3190 ± 40
7	ocel	váleček	5860 ± 20	3190 ± 10
8	ocel	váleček	5890 ± 20	3190 ± 10
9	titan	disk	6100 ± 100	

5.2. Výpočet elastických modulů a jejich chyb

Pro výpočet elastických modulů homogenního izotropního tělesa použijeme řešení Christofelovy rovnice, vztahy (3.12) a (3.13), které přesně platí v případě

izotropního tělesa ve tvaru desky (příčné rozměry desky jsou mnohem větší než vlastní tloušťka).

Krajní chybu elastických modulů určíme pomocí chyby nepřímého měření. Pro určení chyby modulů jsme vyjádřili příslušné parciální derivace ze vztahů (3.12) a (3.13)

$$c_{11} = \rho \cdot v_1^2 \qquad c_{44} = \rho \cdot v_t^2. \quad (5.4)$$

Krajní chybu elastických modulů vyčíslíme pomocí lineárního zákona hromadění chyb

$$\bar{\kappa}(c_{11}) = \left| \frac{\partial c_{11}}{\partial \rho} \bar{\kappa}(\rho) \right| + \left| \frac{\partial c_{11}}{\partial v_1} \bar{\kappa}(v_1) \right| \quad \bar{\kappa}(c_{44}) = \left| \frac{\partial c_{44}}{\partial \rho} \bar{\kappa}(\rho) \right| + \left| \frac{\partial c_{44}}{\partial v_t} \bar{\kappa}(v_t) \right|, \quad (5.5)$$

kde jednotlivé parciální derivace určíme z následujících vztahů

$$\frac{\partial c_{11}}{\partial \rho} = v_1^2 \qquad \frac{\partial c_{11}}{\partial v_1} = 2\rho v_1 \qquad \frac{\partial c_{44}}{\partial \rho} = v_t^2 \qquad \frac{\partial c_{44}}{\partial v_t} = 2\rho v_t. \quad (5.6)$$

Tab. 5.2 Výsledná tabulka elastických modulů

vzorek č.	materiál	tvar	c_{11} [10 ⁹ Pa]	c_{44} [10 ⁹ Pa]
1	sklo	váleček	85 ± 3	30 ± 1
2	sklo	váleček	87 ± 3	31 ± 1
3	sklo	váleček	82 ± 1	28,9 ± 0,4
4	sklo	váleček	86 ± 1	30,3 ± 0,6
5	sklo	čtvercová destička	84 ± 2	30 ± 1
6	ocel	disk	270 ± 70	80 ± 20
7	ocel	váleček	267 ± 4	79 ± 1
8	ocel	váleček	269 ± 2	79,2 ± 0,4
9	titan	disk	167 ± 7	

Lamého konstanty vypočteme podle následujících vztahů

$$\mu = c_{44} \qquad \lambda = c_{12} = c_{11} - 2c_{44}. \quad (5.7)$$

Chyby Lamého konstant stanovíme pomocí lineárního zákona hromadění chyb

$$\bar{\kappa}(\mu) = \bar{\kappa}(c_{44}) \qquad \bar{\kappa}(\lambda) = \left| 1 \bar{\kappa}(c_{11}) \right| + \left| -2 \bar{\kappa}(c_{44}) \right|. \quad (5.8)$$

Tab. 5.3 Výsledná tabulka Lamého koeficientů

vzorek č.	materiál	tvar	μ [10^9 Pa]	λ [10^9 Pa]
1	sklo	váleček	30 ± 1	25 ± 5
2	sklo	váleček	31 ± 1	25 ± 5
3	sklo	váleček	$28,9 \pm 0,4$	24 ± 2
4	sklo	váleček	$30,3 \pm 0,6$	25 ± 3
5	sklo	čtvercová destička	30 ± 1	24 ± 4
6	ocel	disk	80 ± 20	107 ± 116
7	ocel	váleček	79 ± 1	109 ± 7
8	ocel	váleček	$79,2 \pm 0,4$	111 ± 3
9	titan	disk		

Tab. 5.4 Výsledná tabulka elastických modulů a Poissonova poměru

vzorek č.	materiál	tvar	E [10^9 Pa]	ν	G [10^9 Pa]
1	sklo	váleček	73 ± 7	$0,23 \pm 0,03$	30 ± 1
2	sklo	váleček	76 ± 7	$0,22 \pm 0,03$	31 ± 1
3	sklo	váleček	71 ± 3	$0,23 \pm 0,01$	$28,9 \pm 0,4$
4	sklo	váleček	74 ± 4	$0,23 \pm 0,02$	$30,3 \pm 0,6$
5	sklo	čtvercová destička	73 ± 6	$0,22 \pm 0,03$	30 ± 1
6	ocel	disk	214 ± 200	$0,3 \pm 0,2$	80 ± 20
7	ocel	váleček	204 ± 9	$0,29 \pm 0,01$	79 ± 1
8	ocel	váleček	205 ± 4	$0,291 \pm 0,004$	$79,2 \pm 0,4$
9	titan	disk			

Krajní chybu elastických modulů i Poissonova poměru opět určíme pomocí lineárního zákona hromadění chyb využívajícího prvních parciální derivací.

$$\bar{\kappa}(E) = \left| \frac{\partial E}{\partial \mu} \bar{\kappa}(\mu) \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial \lambda} \bar{\kappa}(\lambda) \right| \quad \frac{\partial E}{\partial \mu} = \frac{(3\lambda^2 + 4\lambda\mu + 2\mu^2)}{(\lambda + \mu)^2} \quad \frac{\partial E}{\partial \lambda} = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2} \quad (5.9)$$

$$\bar{\kappa}(\sigma) = \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \mu} \bar{\kappa}(\mu) \right| + \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} \bar{\kappa}(\lambda) \right| \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \mu} = \frac{\lambda}{2\lambda(\lambda + \mu)^2} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)^2} \quad (5.10)$$

$$\bar{\kappa}(G) = \bar{\kappa}(\mu) = \bar{\kappa}(c_{44}) \quad (5.11)$$

6. Diskuse výsledků měření

Pro studované vzorky jsme vypočítali sadu rychlostí uvedených v tabulce 5.1. Dále jsme určili jejich základní mechanické vlastnosti, které jsme zapsali do tabulek 5.2 - 5.4.

Naměřené a spočítané hodnoty materiálových parametrů jsme srovnali s hodnotami udávanými v technické literatuře a publikovanými na internetu. Tabulkové hodnoty jsme zapsali do přehledných tabulek 6.1 až 6.2 s uvedenými odkazy na literaturu, případně na webovské stránky.

Zjistili jsme velice dobrý souhlas s těmito udávanými hodnotami. Přesnost měření odpovídala použité metodice. Pouze v jednom případě u vzorku 6 byla chyba výrazně vysoká. Bylo to způsobeno malými rozměry vzorku, kde se nám nepodařilo hydrostatickou metodou určit hustotu vzorku s dostatečnou přesností, viz. tabulka 4.2.

6.1. Tabulkové hodnoty měřených parametrů studovaných materiálů

Tab. 6.1 Tabulkové hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku studovaných materiálů.

materiál	v_l [ms⁻¹]	v_t [ms⁻¹]
ocel [10]	5960	3235
sklo [10]	3980 - 5640	2380 - 3280
titan [10]	6070	3125
titan – tenký prut [14]	5090	

Tab. 6.2 Tabulkové hodnoty elastických modulů a Poissonova poměru.

Materiál	E [10⁹ Pa]	ν	G [10⁹ Pa]
uhlíková ocel na odlitky [12]	196 - 216	-	76 - 83
legovaná ocel na ložiska[13]	185 - 215	0,33	75
sklo [10]	48 - 83	0,20 – 0,27	19 - 34
titan [10]	110	0,33	40
titan – tenký prut [14]	116	0,32	44

6.2 Obecné vlastnosti studovaných materiálů

6.2.1 Oceli

Naměřené hodnoty Youngova modulu E , ocelových vzorků číslo 7 a 8, ložiskových válečků v tabulce 5.4, odpovídají udávaným hodnotám ve strojnických tabulkách pro legované oceli v tabulce 6.2. Legované oceli mají E v rozmezí od $1,85$ do $2,15 \cdot 10^5$ MPa, pouze litiny pak mají $E = (1,3 - 1,8) \cdot 10^5$ MPa. Pro uhlíkovou ocel je tato hodnota $2,1 \cdot 10^5$ MPa. Velikost Poissonova poměru $\sigma = 0,29$ nám vyšla poněkud nižší než udávaná hodnota $\nu = 0,33$. Pro většinu kovů je Poissonův poměr $\sigma = 0,33$. Také modul ve smyku $G = 79$ GPa nabývá vyšší hodnoty než je uvedeno v literatuře pro legovanou ocel, viz. tab. 6.2.

Odlišně naměřené hodnoty pro ložiskovou ocel jsou zřejmě způsobeny nevhodným tvarem vzorků 7 a 8. Malý diskový vzorek 6 dává hodnotu Poissonova poměru bližší hodnotě uváděné pro většinu kovů $\nu = 0,33$. Tento vzorek mnohem lépe splňuje podmínku, že tloušťka je mnohem menší jeho příčné rozměry oproti válcovým vzorkům 7 a 8.

Vypočítané hodnoty elastických konstant pro tento malý vzorek číslo 6 jsou zatíženy enormní chybou způsobenou měřením hustoty na takto malém vzorku materiálu. Důvodem je jeho malá hmotnost, kterou na běžných rovnoramenných vahách nemůžeme určit s dostatečnou přesností. Pro odstranění takto velké chyby bychom museli hustotu určit pomocí hmotnějšího vzorku téhož materiálu nebo použít tabulkovou hodnotu s chybou, nicméně průměrná hodnota hustoty vcelku odpovídá udávané tabulkové hodnotě [10] a [12] pro ocel.

Vzorek 6 je z tyčové oceli a byl připraven bez problémů soustružením. Materiálem vzorku měla být údajně ocel pro všeobecné použití ČSN 11 109 DIN: W: 10715, EN 10 087. Průměrné hodnoty elastických konstant jsou výrazně vyšší, čemuž odpovídají i naměřené rychlosti ultrazvuku ve vzorku. Jedná se tedy zřejmě o kvalitní ocel.

6.2.2 Skla

Námi určené hodnoty Youngova modulu, modulu ve smyku G a velikost Poissonova poměru ν leží pro všechny měřené vzorky v horní hranici uváděných tabulkových hodnot. Naměřené hodnoty pro vzorek 3 jsou poněkud nižší což odpovídá nižší pevnosti křišťálového skla, které má také nižší bod tání než ostatní měřené vzorky.

Ploché (float) a obalové sklo je nejlevnější a nejrozšířenější typ skla. Po technické stránce má pouze průměrné vlastnosti. Používá se pro plochá okenní a automobilová skla, výrobu lahví a jako levné užitkové sklo.

Křišťálová skla mají průměrné vlastnosti. Takto označená skla obsahují více 4% oxidu olovnatého. Přítomnost olova změkčuje sklo a tím usnadňuje jeho broušení a rytí. Olovo přidává sklu na hmotnosti a způsobuje, že sklo více láme světlo, takže třetí paprsky jím procházející do duhových barev [16].

Křemenné sklo (SiO_2) se vyrábí tavením velmi čistého křemene v grafitových kelímcích ve vakuu při teplotách kolem 2000 °C. Má výborné chemické, elektrické a optické vlastnosti a teplotní odolnost, ale je drahé. Využívá se pro extrémní podmínky v průmyslu a vědě. Toto sklo nebylo proměřováno, ale uvádíme jej zde, protože se používá jako velice kvalitní a tepelně odolný materiál pro výrobu prodlužovacích vedení ultrazvukových sond [2], [5] a [8].

6.2.3 Titan

Naměřená hodnota rychlosti podélných ultrazvukových vln dobře odpovídá hodnotám uváděným v literatuře [14]. Hodnota uvedená pro rychlost zvuku v tenkém prutu je nižší. Je to proto, že okrajové podmínky nesplňují podmínky námi uvedené teorie, kde předpokládáme naopak příčné rozměry větší než tloušťka (délka) vzorků, tak jak jsme již uváděli pro válcové vzorky ložiskové oceli v kapitole 6.1.1. Vzhledem k tomu, že se nám nepodařilo změřit rychlost příčných vln, jsme nemohli určit Youngův modul E , velikost Poissonova poměru ν a také modul ve smyku G .

Titan řadíme mezi polymorfní kovy s nízkou hustotou, velmi vysokou odolností vůči korozi, vynikající mechanickými vlastnostmi a teplotní odolností [15].

I když se nám nepodařilo určit elastické moduly, tak z tabulkových hodnot je patrné, že titan má nižší modul pružnosti v tahu ($E = 110 \text{ GPa}$) a také smykový modul

($G = 40 \text{ GPa}$), které jsou přibližně poloviční než u oceli. Poissonův poměr je stejný jako pro ostatní kovy ($\nu = 0,33$) [14].

7. Závěr

7.1. Měření mechanických vlastností technických materiálů ve strojírenské praxi

Měření mechanických vlastností může sledovat různé cíle. První a nejstarší z nich je získání číselných podkladů pro konstruktéry. Za druhé slouží mechanické vlastnosti jako ukazatelé kvality. Jsou kritériem při výstupní kontrole nebo přejímce materiálů. Za třetí v základním materiálovém výzkumu, který usiluje o pochopení a strukturní vysvětlení mechanického chování a konkrétních mechanických vlastností.

Ve strojírenství se mechanické vlastnosti ocelí a vůbec kovových materiálů udávají často pomocí tahové zkoušky. Dle normy ČSN 42 0310 se tahovou zkouškou určují zpravidla následující vlastnosti [7] a [12]:

- a) mez pevnosti v tahu (R_m, σ_{Pt})
- b) mez kluzu (R_e, σ_{Kt})
- c) smluvní mez kluzu ($R_r, R_p, R_t, \sigma_{0,2}$)
- d) tažnost (A, δ)
- e) kontrakce (Z, Ψ).

Strojírenská praxe vyžaduje jednoduchá mechanická měření zvláště nelineárního chování technických materiálů, jako je mez pevnosti v tahu (R_m, σ_{Kt}), mez kluzu (R_e, σ_{Kt}), tažnost (A, δ) atd.

Hodnoty E , G a Poissonův poměr ν udávají fyzikální vlastnosti konstrukčních materiálů a doplňují tak další důležité mechanické parametry, nezbytné pro konstrukci spolehlivých a bezpečných zařízení a staveb.

7.2. Zhodnocení použité ultrazvukové metody pro měření mechanických vlastností technických materiálů

Použitá ultrazvuková metoda umožňuje snadný způsob měření rychlosti šíření ultrazvukového vlnění a nedestruktivní určení mechanických vlastností. Studuje šíření podélné, tak i příčné ultrazvukové vlny v materiálu. V případě homogenních a izotropních materiálů můžeme změřením rychlosti podélných a příčných ultrazvukových vln určit mechanické vlastnosti, které plně určují pouze dvě nezávislé materiálové konstanty, za které mohou být zvoleny např. modul pružnosti v tahu (Youngův modul) E a Poissonovo číslo ν , modul pružnosti v tahu E a modul pružnosti ve smyku G nebo Lamého koeficienty μ a λ .

Výhodou ultrazvukových metod je možnost použití malých vzorků, nejlépe ve tvaru disku, či desky, kdy tloušťka je menší než jsou příčné rozměry vzorku. Pro přesná měření je potřebné určit hustotu a tloušťku vzorku s co nejvyšší přesností. Přesnost určení doby průletu je dána přesností odečtu polohy odezev na digitálním osciloskopu. Ta je dána fundamentální pracovní frekvencí použité sondy a kvalitou odezvy danou planparalelitou povrchů vzorků a s co nejnižším vlivem parazitních odezev. Posun píků vlivem parazitního signálu je možné pozorovat a kompenzovat lineární regresí po sobě jdoucích odezev viz. kapitola 4.1.4, kdy směrnice nám udává přesnější hodnotu doby průletu.

Tato měření se v principu mohou provádět při různých teplotách, s přiloženým mechanickým napětím (hydrostatickým tlakem), s přiloženým elektrickým polem atd. a měřit elastické moduly v extrémních vnějších podmínkách (nelineárního chování technických materiálů, jako je mez pevnosti v tahu (R_m , σ_{Kt}), mez kluzu (R_e , σ_{Kt}), tažnost (A , δ) atd.).

Součástí měření bylo též stanovení hustoty vzorků hydrostatickou metodou. Součástí práce bylo určení chyb výsledků nepřímých měření při určování rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln, základních elastických konstant viz. kapitola 5.2.

7.3. Využití ultrazvuku při výuce na ZŠ a SŠ

Význam ultrazvuku při výuce na školách všech stupňů je dán jeho existencí v přírodě, ale i v medicíně, výzkumu a hlavně v průmyslu. Již na prvním stupni ZŠ je možné se zmínit o existenci ultrazvukové echolokace v přírodě (netopýr, mýry) při

výuce prvouky. Na druhém stupni ZŠ se můžeme zmínit o ultrazvuku jako zvuku s vyšší frekvenci při výuce vlastností a chování zvuku. Velmi vhodným se jeví využití ultrazvuku při fyzikálních pokusech, například při měření polohy, rychlosti a zrychlení pomocí ultrazvukových čidel. Což využijme např. na druhé stupni ZŠ při výuce rovnoměrného pohybu těles a středních školách při výuce rovnoměrně zrychleného pohybu. Na středních školách je možné hovořit již i o složitějších aplikacích ultrazvuku v medicíně, vědě a hlavně v průmyslu. Můžeme studenty seznámit s principy ultrazvukového sváření (plasty), vrtání, řezání (drahé kameny) a např. čištění (brýle, pístní kroužky) [8]. Dalšími známými aplikacemi jsou sonary u námořního loďstva a ponorek, využití v medicíně při vyšetřování plodu a ultrazvukové defektoskopii. V současné době se hovoří i o použití ultrazvuku v audiotechnice (audioreflektr).

7.4. Zhodnocení vytyčených cílů práce

Během realizace diplomové práce jsme se jednak seznámili se složitou ultrazvukovou aparaturou pro přesná měření rychlosti ultrazvuku nejlépe tenkých vzorků (0,3-5,0mm). Pro přesná měření jsme museli zajistit kvalitní kontaktní vazbu vzorku s ultrazvukovými sondami. Měřené ultrazvukové odezvy jsme zaznamenali na osobním počítači prostřednictvím GPIB sběrnice a obslužného softwaru. Naměřená data jsme zpracovali programem ORIGIN 7, který provádí vlastní výpočty a vykresluje grafy.

Zároveň v diplomové práci prezentujeme teorii šíření ultrazvukových vln v homogenním izotropním prostředí pro dané okrajové podmínky (neomezená tenká deska). Uvádíme zde vztahy pro výpočet elastických modulů (E , G , μ , λ) a Poissonův poměr ν . Součástí práce bylo určení hustoty vzorků hydrostatickou metodou a výpočet chyb nepřímého měření.

Pro vlastní měření jsme si vybrali vzorky, které ne vždy splňovaly okrajové podmínky pro použitou teorii v kapitole 3., tj. tloušťka je mnohem menší než příčné rozměry vzorků. Bylo to dáno tím, že vzorky skla válcového tvaru, byly určeny pro mechanická deformační měření (creep) a neměli jsme možnost je nařezat do tenkých destiček. Pouze vzorky číslo 5 (tabulové sklo) a 6 disk z ocelové kulatiny splňovaly okrajové podmínky teorie. Vzorek číslo 9 z titanu neměl kvalitní povrch a planoparalelitu měrných stěn, a proto se nám nepodařilo určit rychlost příčného ultrazvukového vlnění. Z měření vyplynulo, že nesplnění okrajových podmínek ovlivnilo nejvíce hodnotu Poissonova poměru.

Určené materiálové parametry jsme přehledně zapsali do tabulek a v diskusi porovnali s hodnotami udávanými v literatuře a na internetu. V závěru krátce pojednáváme o ultrazvuku a jeho využití ve výuce a v různých oborech lidské činnosti.

8. Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] ŠIMONOVÁ-ČEŘOVSKÁ, J. *Ultrazvuk a jeho užití v praxi*. 1. vyd. Praha: 1941
- [2] KLIMOVIČ, Josef, SLADKÝ, Petr. *Praktikum z Chemické fyziky – 2. svazek*. 1. vyd. Praha: 1980
- [3] HORÁK, Zdeněk, KRUPKA, František. *Fyzika*. 2. vyd. Praha: 1976
- [4] ŠVEHLA, Š., FIGURA, Z. *Ultrazvuk v technologii*. 1. vyd. Bratislava: 1984
- [5] TARABA, Oldřich. *Co dovede ultrazvuk*. 1. vyd. Praha: 1958
- [6] ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L., BURIANOVÁ, L. *Úvod do fyzikálních měření*. 2.vyd. Liberec: 2001
- [7] BRDIČKA, M., SAMEK, L., SOPKO, B. *Mechanika kontinua*. 2. vyd. Praha: 2000. ISBN 80-200-0772-5.
- [8] OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. 1. vyd. Praha: 1989
- [9] ROYER, D., DIEULESAINT, E. *Elastic Waves in Solids I*. Berlin: 2000, ISBN 3-540-65931-5.
- [10] ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L., ŠÍMA, Z. *Fyzikální tabulky*. 1.vyd. Liberec: 2001. ISBN 80-7083-515-X
- [11] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠINDELÁŘ, V. *Technická fyzika*. 1. vyd. Praha: 1960
- [12] BARTOŠ, J. *Strojnické tabulky*. 10. vyd. Praha: 1971
- [13] <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P03.pdf>
- [14] <http://titan.navajo.cz>
- [15] <http://www.bibus.cz>
- [16] <http://www.ecrystal.cz>